



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Análisis y optimización de sistemas de extracción de energía undimotriz contruidos en diques verticales

Trabajo realizado por:

Pablo María García-Maribona López-Sela

Dirigido:

Javier López Lara

Titulación:

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

TRABAJO FIN DE MASTER

Santander, febrero de 2022

Resumen

Título: Análisis y optimización de sistemas de extracción de energía undimotriz construidos en diques verticales.

Autor: Pablo María García-Maribona López-Sela.

Director: Javier López Lara.

Convocatoria: Febrero 2022.

Palabras clave: OWC, energía, undimotriz, dique, vertical, Alicante.

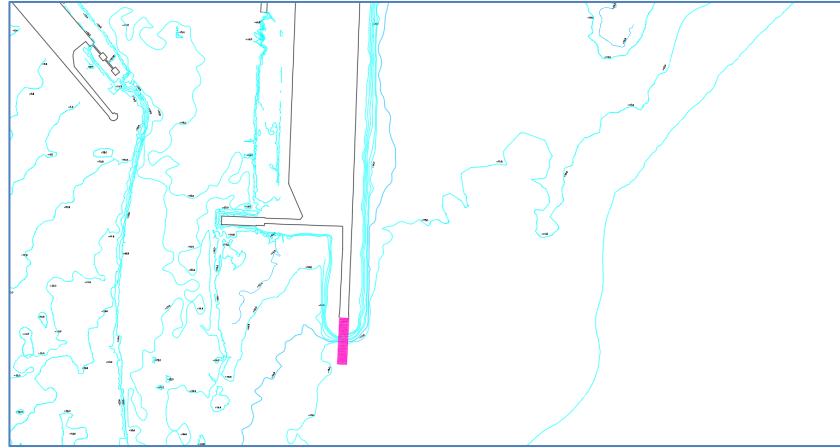
Planteamiento del problema y desarrollo de la solución adoptada:

Debido a la demanda energética en constante aumento y la consecuente emisión de gases de efecto invernadero, provocada por la generación de esta energía a partir de procesos de combustión, surge la necesidad de desarrollar diferentes métodos de producción. Uno de estos métodos alternativos es la energía marina, que es la energía contenida en los océanos y mares en forma de olas, corrientes, etc. En este documento se estudiará la columna de agua oscilante o OWC (*Oscilating Water Column*), que es un dispositivo que transforma el movimiento de las olas en un flujo de aire cuya energía es aprovechada por una turbina unida a un rotor que conforma el sistema generación de energía.

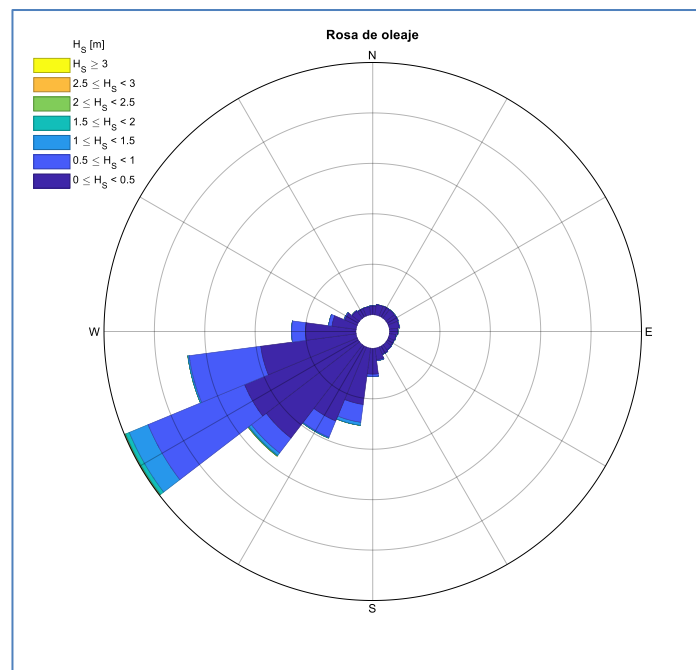
Estos sistemas de columna de agua oscilantes requieren ser dimensionados y optimizados en función del clima marítimo, a partir de los estados del mar registrados a lo largo de los años. Asimismo, deberán cumplir con las condiciones de funcionamiento, considerando que estos dispositivos son comúnmente implantados en diques ya existentes o siendo la continuación de estos. En este caso, la columna de agua oscilante de 100 m de longitud será la prolongación de un dique en el puerto de Alicante y se determinará la geometría del dique vertical en el que irá implantada.

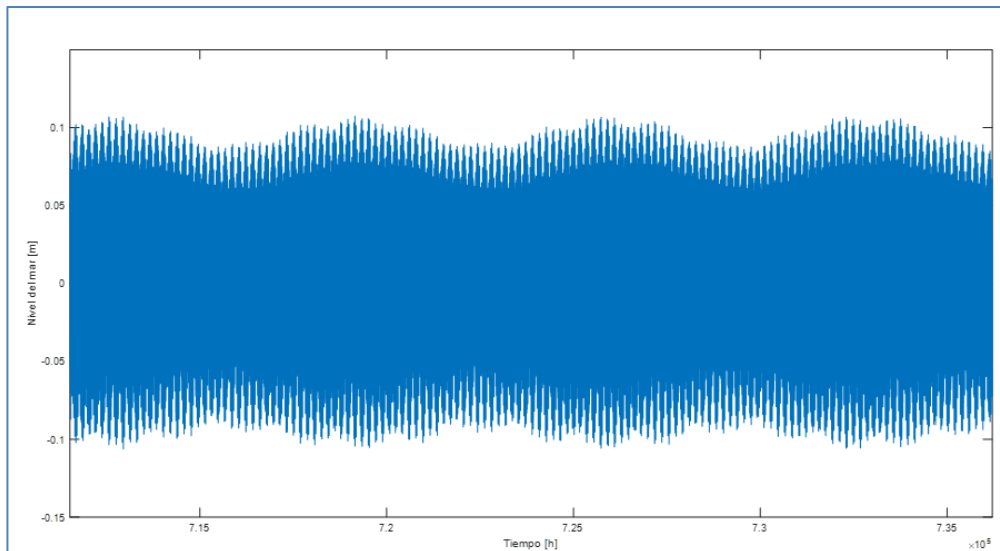
Para simular los movimientos del agua y el aire en la columna de agua oscilante, debido a su complejidad, se utilizarán métodos computacionales. El CFD (*Computational Fluid Dynamics*) permite la optimización de la geometría, para poder generar un estado de resonancia para las condiciones de mar deseadas, que también serán determinadas. Los métodos CFD tienen un alto costo computacional, por lo que la geometría inicial debe calcularse utilizando una formulación más simple, generalmente asimilando el movimiento de la OWC a un mecanismo de pistón.

Dado que la zona de implantación es el extremo del dique del muelle de poniente del Puerto de Valencia, se ha realizado un estudio del clima marítimo con las bases de datos DOW, GOT y GOS de puntos cercanos. El análisis estadístico del oleaje de la zona se ha realizado mediante el método de picos sobre el umbral, con el que se ha conseguido una función de distribución de los valores extremos para el posterior dimensionamiento de la estructura.



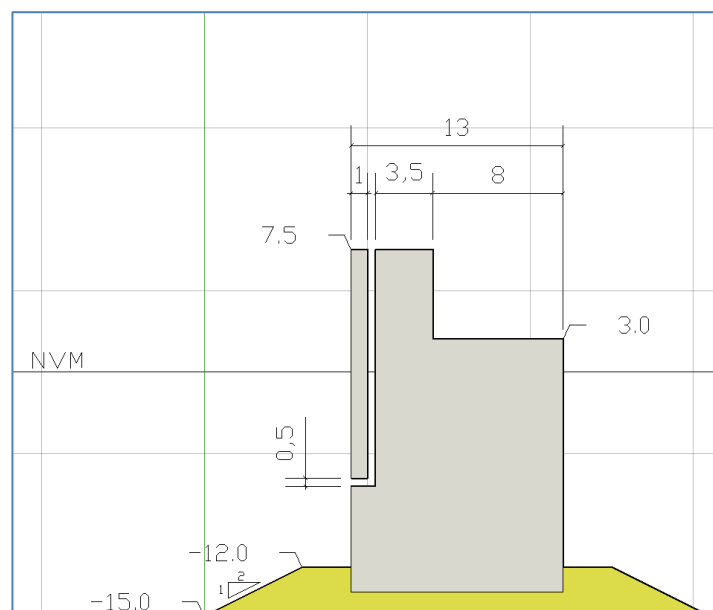
La batimetría frente a la zona de implantación presenta pendientes suaves y profundidades en el entorno de los 15 m. El clima marítimo de la zona se caracteriza por un oleaje típico de la costa mediterránea de España, con alturas de ola reducidas que raramente superan los 3 m de altura y que en, este caso, proceden mayoritariamente del sector ENE debido a que la zona se encuentra protegida por la orografía que la rodea. Una peculiaridad del área de estudio es su carrera de mareas astronómica extremadamente reducida, con una diferencia de aproximadamente 20 cm entre su nivel máximo y mínimo, por ello se toma como el nivel de referencia del nivel del mar en España. En cuanto a sus mareas, considerando la componente meteorológica, sigue tratándose de valores reducidos, llegando pocas veces a niveles del mar superiores a los 40 cm.





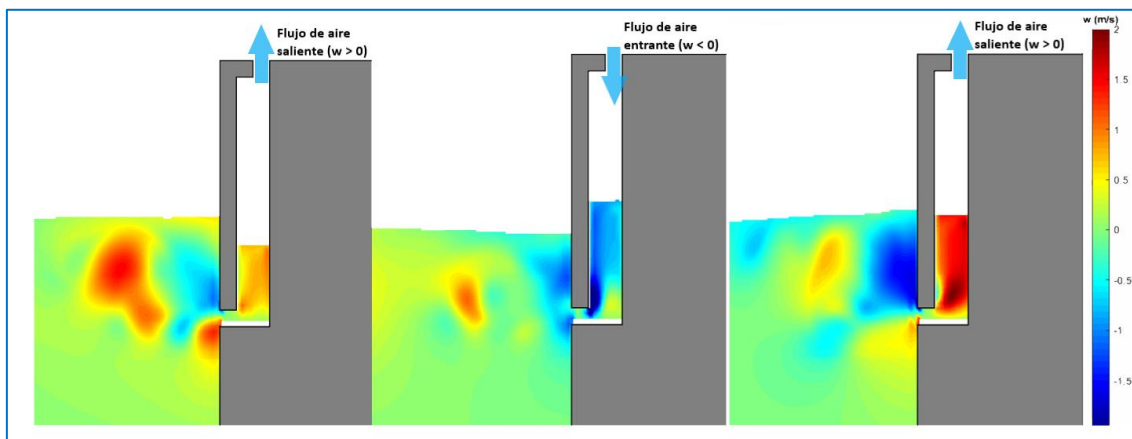
En cuanto a la estructura, se trata de un dique vertical que ha sido diseñado teniendo en cuenta tanto la estabilidad como la funcionalidad, utilizando los criterios de diseño propuestos por la ROM 0.0-01 para la obtención de la probabilidad de fallo y vida útil de la obra, así como el método de cálculo y verificación.

Se ha diseñado la cota de coronación del espaldón para que esta asegure que el rebase medio no sea superior a 0,3 L/s/m siguiendo las indicaciones del EuroTop 2018, adoptando posteriormente un valor constructivo. En cuanto al diseño del dique frente a los esfuerzos hidrodinámicos y el posible vuelco o deslizamiento que estos pudieran provocar, se han barajado diferentes formulaciones, concluyendo que la más apropiada para el caso es la propuesta por Goda (1985) ya que se determinó que no se daría rotura del oleaje sobre el paramento del dique vertical. Además, se ha expuesto la formulación de Tanimoto (1982) para comprobar que la berma no sufrirá una afección importante del oleaje para la geometría típica de un dique de estas características.



Una vez diseñado el dique vertical, se ha procedido a la cuantificación de la energía undimotriz disponible en la zona de estudio, desarrollando la formulación necesaria y determinando de esta forma el periodo óptimo de diseño, siendo este aquel para el cual se produce el máximo energético considerando la probabilidad de ocurrencia de los diferentes estados de mar.

Conocido este periodo óptimo de diseño, se han utilizado diversas formulaciones para una primera estimación de la geometría de la cámara de oscilación y posteriormente se ha procedido a la preparación y ejecución de múltiples simulaciones con el software de computación de dinámica de fluidos IH2VOF, comprobando el comportamiento de diferentes geometrías ante el oleaje.



Encontrada la geometría óptima, se ha simulado para diferentes estados de mar, con el fin de obtener las velocidades de flujo dentro de la cámara en el dominio del tiempo y con ellas hacer una estimación de la producción energética del caso concreto de la cámara diseñada para la zona y clima marítimo de implantación.



Abstract

Title: Analysis and optimization of wave energy extraction systems built in vertical breakwaters.

Author: Pablo María García-Maribona López-Sela.

Director: Javier López Lara.

Announcement: February 2022.

Key words: OWC, energy, wave energy, breakwater, Alicante.

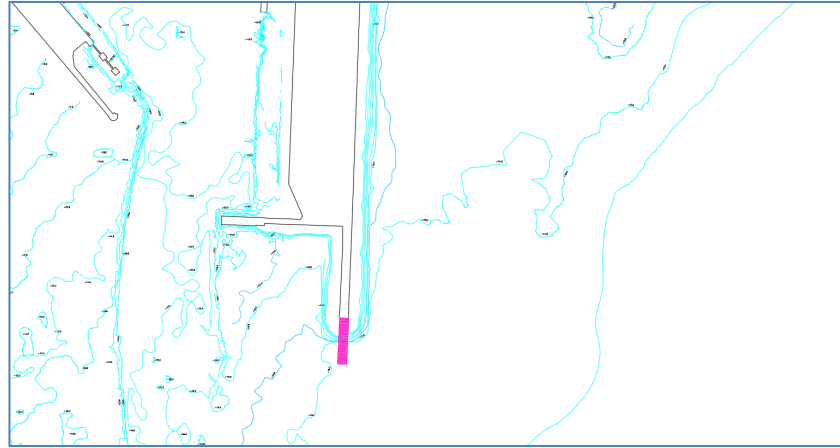
Problem statement and development of the adopted solution:

Due to the energy demand that is constantly increasing and the consequent greenhouse gases emission, caused by the generation of this energy based on combustion processes, there is a necessity of developing different production methods. One of these alternative methods is the marine energy, which is the energy contained in the oceans and seas as waves, currents, etc. This document will study the OWC (Oscillating Water Column), which is a device that transforms the wave motion in an air flow whose energy is used by a turbine attached to a rotor which conforms the power take off system.

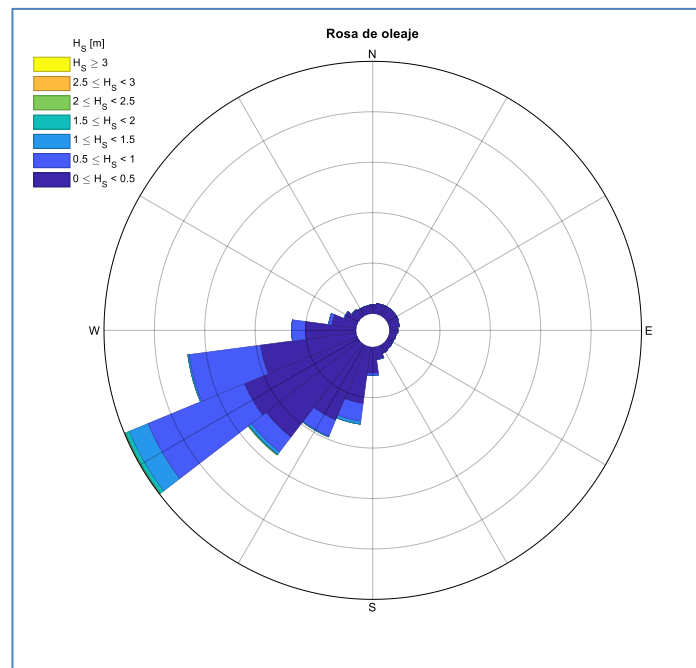
These oscillating water column systems requires to be sized and optimized in function of the maritime climate, starting from the sea states recorded over the years. Also, they must satisfy the functional conditions, considering that these devices are commonly attached to already existing dykes or giving them continuity. In this case, the OWC will be a 100 m extension of a breakwater in the Alicante's port and the geometry of the vertical breakwater in which it will be implanted will be determined.

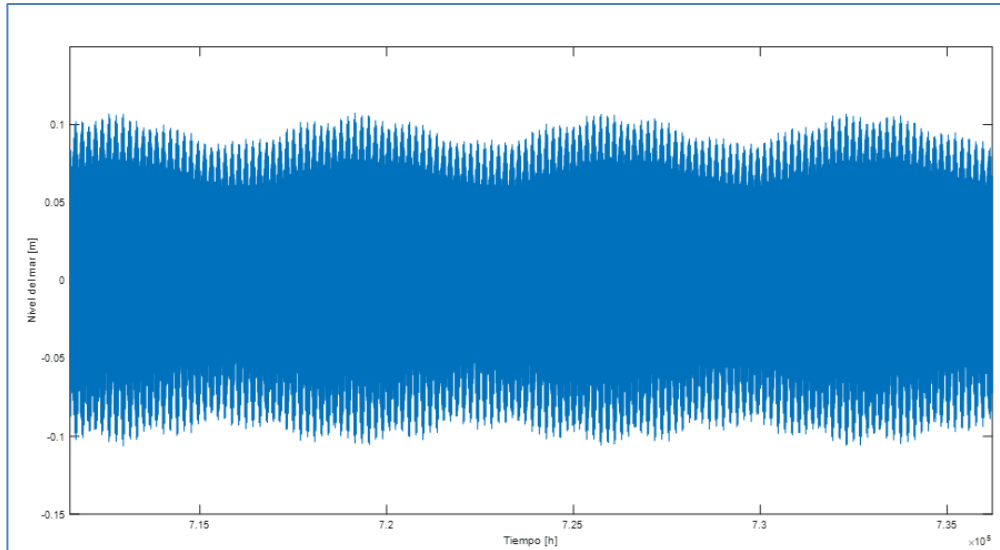
To simulate the motions of water and air into de oscillating water column, due to its complexity, computational methods will be used. The CFD (Computational Fluid Dynamics) allows the optimization of the geometry, generating a resonation state for the desired sea conditions, that will be also determined. The CFD methods have a high computational cost, so the starting geometry must be calculated using simpler formulation, usually assimilating the motion of the OWC to a piston mechanism.

Considering that the implantation area is the extreme of the dock at west quay of the Port of Valencia, a study of the maritime climate has been carried out with the DOW, GOT and GOS databases of nearby points. The waves statistical analysis of the area has been carried out using the method of peaks above the threshold, obtaining a distribution function of the extreme values for the following dimensioning of the structure.



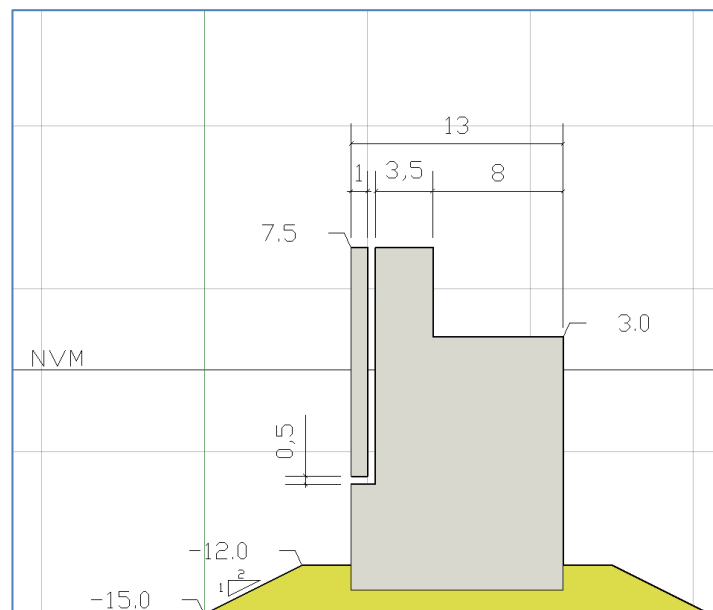
The bathymetry in front of the implantation area presents reduced slopes and depth values around 15 m. The maritime climate of the area is typical in the Mediterranean coast of Spain, with reduced wave heights that rarely exceed 3 m that comes mostly from the ENE sector, because the area is protected by the surrounding orography. A peculiarity of the study area is its extremely reduced astronomical tidal amplitude, with a difference of approximately 20 cm between its maximum and minimum level, which is the reason why it is considered as the reference of sea level in Spain. Considering the meteorological component, it is still reduced values, rarely reaching sea levels above 40 cm.





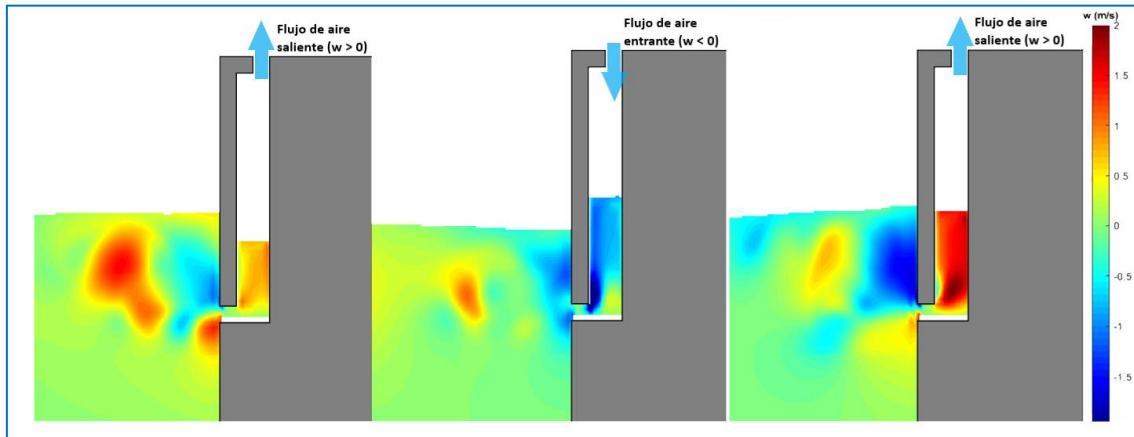
The structure is a vertical breakwater that has been designed considering both stability and functionality, using the design criteria proposed in ROM 0.0-01 to obtain the probability of failure and design lifetime of the work, as well as the method of calculation and verification.

The crowning height of the breakwater has been designed so it ensures that the average overtopping is not greater than 0.3 L/s/m following the indications on EuroTop 2018, adopting a constructive value. For the hydrodynamic design of the breakwater and the possible toppling or sliding, different formulations have been considered, concluding that the most appropriate is the one proposed by Goda (1985) since it was determined that there won't be waves breaking over the vertical breakwater. In addition, the formulation of Tanimoto (1982) has been used to verify that the berm will not suffer a significant damage caused by the waves for the typical geometry of a breakwater of these characteristics.



Once the vertical breakwater has been designed, the waves energy available in the study area has been quantified, developing the necessary formulation, and thus determining the optimal design period, being the period where maximum energy is produced considering the probability of occurrence of the different sea states.

Once this optimal design period is known, various formulations have been used for a first estimation of the geometry of the oscillation chamber and followed by the preparation and execution of multiple simulations with the fluid dynamics computing software IH2VOF, checking the behavior of different geometries under the sea state.



Once the optimal geometry is known, different sea states have been simulated, in order to obtain the flow velocities within the chamber in the time domain and using them to estimate the energy production of the specific case of the chamber designed for the maritime climate and area of implantation.

Abreviaciones

Siglas	Significado
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
ELS	Estado Límite de Servicio
ELU	Estado Límite Último
GEV	<i>General Extreme Value</i>
IRE	Índice de Repercusión Económica
ISA	Índice de repercusión Social y Ambiental
OWC	<i>Oscillating Water Column</i>
POT	<i>Peak Over Threshold</i>
PTO	<i>Power Take Off</i>
TPM	Tonelaje de Peso Muerto
WEC	<i>Wave Energy Converter</i>

Índice

1.	Introducción	1
1.1.	Objetivos	1
1.2.	Descripción de la zona de estudio	1
2.	Estado del arte	3
2.1.	Columna de agua oscilante	3
2.2.	Diques verticales	7
2.2.1.	Descripción de la tipología	7
2.2.2.	Proceso constructivo	9
2.3.	Métodos de cálculo	10
3.	Criterios de diseño del dique vertical	11
3.1.	Buque de proyecto	11
3.2.	Tramificación de la obra	13
3.3.	Carácter general de la obra	13
3.3.1.	Índice de Repercusión Económica (IRE)	13
3.3.2.	Índice de Repercusión Social y Ambiental (ISA)	14
3.3.3.	Vida útil y probabilidad de fallo conjunta	16
3.3.4.	Método de verificación	16
3.4.	Carácter operativo de la obra	17
3.4.1.	Índice de Repercusión Económica Operativo (IREO)	17
3.4.2.	Índice de Repercusión Social y Ambiental Operativo (ISAO)	18
3.4.3.	Condiciones de operatividad del buque	18
4.	Estudio de batimetría y clima marítimo	19
4.1.	Batimetría	19
4.2.	Clima marítimo	20
5.	Diseño del dique vertical	27
5.1.	Diseño funcional del dique vertical	27
5.2.	Diseño último del dique vertical	29
5.2.1.	Berma de protección del pie del dique	30
5.2.2.	Estabilidad del dique	32
6.	Diseño del dispositivo OWC	38
6.1.	Potencial energético del oleaje	38
6.2.	Energía aprovechable por el sistema OWC	40
6.3.	Periodo óptimo de diseño	41
6.4.	Geometría de la cámara	43

7.	Optimización mediante CFD	44
7.1.	Metodología.....	44
7.2.	Resultados.....	48
	Geometría de la cámara	48
	Energía del oleaje disponible.....	53
	Energía producida.....	57
8.	Conclusiones.....	60
8.1.	Clima marítimo.....	60
8.2.	Diseño estructural.....	61
8.3.	Diseño de la cámara de oscilación.....	62
9.	Bibliografía.....	64
	Índice de Figuras.....	66
	Índice de Tablas	68
	ANEXO: CÓDIGO UTILIZADO (MATLAB).....	69

1. Introducción

1.1. Objetivos

En el presente trabajo se realizará un análisis de los sistemas undimotrices de columna de agua oscilante para la extracción de la energía del oleaje. Este análisis se basará en el uso de software de fluidodinámica computacional estudiando diferentes geometrías de la columna, la cual estará ubicada en un dique vertical en el Puerto de Alicante y será diseñada para el clima marítimo de la zona.

Para cumplir estos objetivos, en el presente trabajo se desarrollan las siguientes tareas:

- Estudio del clima marítimo local a partir de los datos facilitados por IH Cantabria.
- Diseño del dique vertical que albergará el sistema de extracción de energía.
- Obtención el periodo óptimo de diseño para la generación de energía.
- Realización modelizaciones del dispositivo de columna de agua oscilante con herramientas basadas en la fluidodinámica computacional.
- Realización un diseño optimizado de la geometría del dispositivo.
- Estimación de la energía generada por el dispositivo.

1.2. Descripción de la zona de estudio

La ubicación por estudiar es el Puerto de Alicante (Figura 1), en el sur de la Comunidad Valenciana que se encuentra en la costa este de España, bañada por las aguas del Mar Mediterráneo.

Este puerto tiene actualmente un gran enfoque en el tráfico de contenedores y se ha consolidado como un enclave esencial para la salida de productos del norte de África, Baleares y Canarias. Otra componente importante de este puerto es el tráfico de pasajeros, ya que su clima y su favorable ubicación lo convierten en una interesante opción para la escala o puerto base de grandes cruceros.



Figura 1. Ubicación geográfica del puerto de Alicante.

Más concretamente, la zona de implantación del dique vertical que albergará el sistema de extracción de energía es el extremo sur del muelle de poniente (Figura 2 y Figura 3). Esta zona de implantación está enmarcada en la ampliación del puerto acometida por OHL, que comenzó en el año 2003 varias obras de abrigo y así como de nuevos muelles y explanadas.

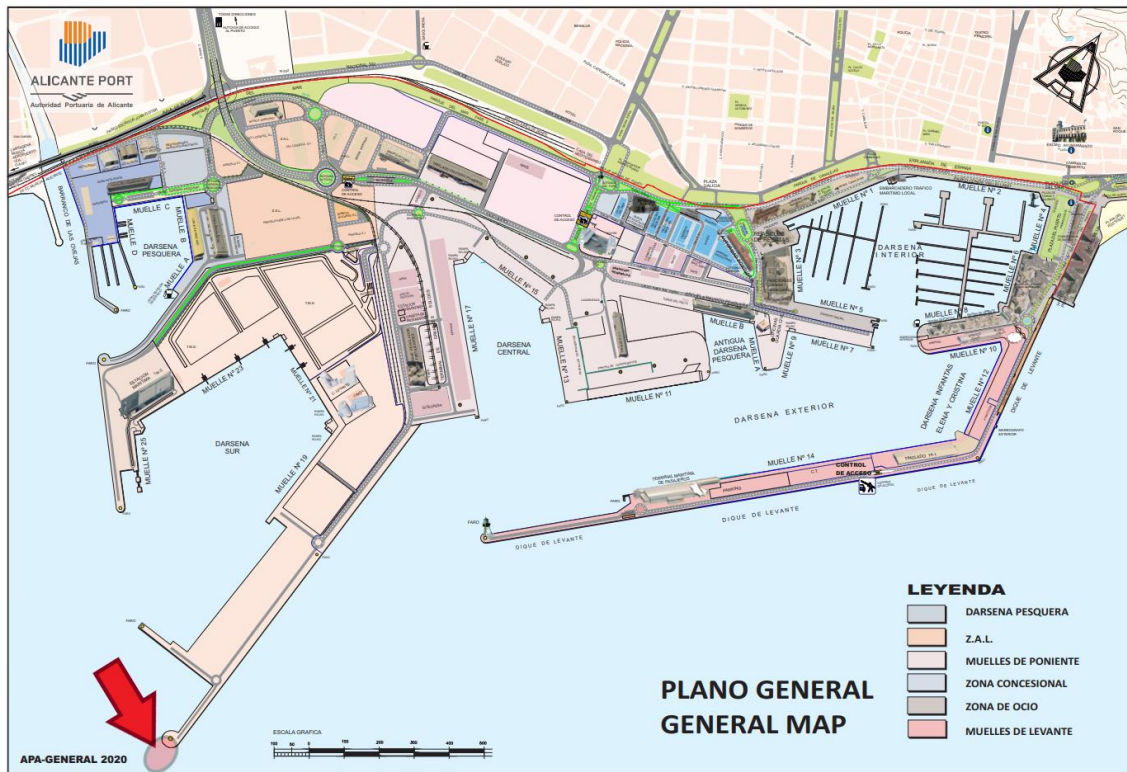


Figura 2. Plano general del puerto de Alicante. Obtenido en: <https://www.puertoalicante.com/wp-content/uploads/2021/06/plano-general-para-memoria-2020.pdf>.



Figura 3. Imagen de satélite del Muelle de Poniente y zona de implantación (en rojo) superpuesta.



Los orígenes del Puerto de Alicante se remontan al siglo V a.C cuando, al abrigo de la Bahía de Alicante, la zona de La Albufereta se convirtió en un enclave del pueblo íbero. Esta población, que tomó el nombre del Tossal de les Basses, se valió de la laguna marina de La Albufereta para su actividad portuaria hasta que la zona fue tomada por el imperio Romano tras las segundas Guerras Púnicas. Durante el dominio del pueblo romano, el recinto portuario se expandió contando ya con un muelle de 48m de longitud y 1,5m de calado, cuya actividad no cesó hasta el declive entre los siglos II y III d.C al debilitarse las relaciones comerciales. Hasta el siglo VII en el cual se funda la villa musulmana de Medina Lanqant de la cual existen escritos que destacan la construcción de barcos comerciales en el astillero de su zona portuaria.

No es hasta el año 1271 que el rey Alfonso X declara la ciudad de Alicante como el Puerto Público del Mediterráneo y en los sucesivos siglos, su desarrollo y actividad comercial han ido creciendo.

En la década de los 90 el Puerto de Alicante experimenta su crecimiento más acusado con el desarrollo del Plan Especial del Puerto que conllevó una ampliación de este y una integración con la ciudad y el paisaje de la zona. Actualmente es uno de los puertos más importantes de España en cuanto a tráfico de mercancías y pasajeros dada su privilegiada ubicación.

2. Estado del arte

En los siguientes subcapítulos se comentará el estado del arte de los diversos temas a tratar en este documento.

2.1. Columna de agua oscilante

El oleaje supone una fuente de energía renovable y limpia, cuya explotación reduce la dependencia de los combustibles fósiles u otras fuentes que provoquen emisiones nocivas para el medioambiente o la salud. Además, esta fuente de energía puede suponer una gran ventaja para ciertos países costeros donde es un recurso abundante (Figura 4), reduciendo sus necesidades de importación y generando también empleo.

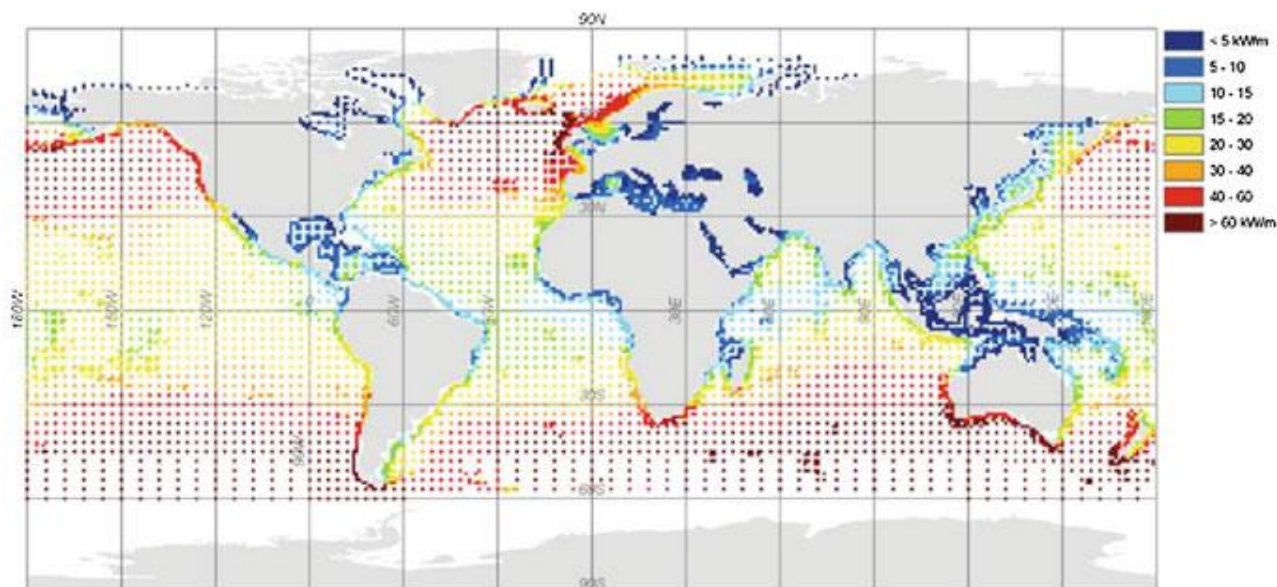


Figura 4. Distribución global de la energía de oleaje anual según WorldWaves.

Los dispositivos WEC (*Wave Energy Converter*) son aquellos destinados a transformar esta energía del oleaje en energía eléctrica, utilizando diferentes sistemas de extracción de energía, conocidos también como PTO (*Power Take Off*). La primera patente de un dispositivo WEC data del año 1799, sin embargo, no fue hasta finales del siglo XX que obtuvo una popularidad generalizada entre la comunidad científica.

Para que exista una absorción de la energía del oleaje, el dispositivo WEC ha de generar una onda tal que interactúe de forma destructiva con la ola reflejada, con lo que la ola resultante es una suma de la ola incidente con la reflejada, una vez sustraída la interferencia destructiva que genera el WEC. Este proceso se presenta forma gráfica en la Figura 5.

La onda generada ha de estar en fase con las reflejada y ha de tener su misma amplitud para que ambas se cancelen completamente, un diseño optimizado conseguirá una buena aproximación a estas condiciones. Así pues, un dispositivo ideal, que cancelaría totalmente la ola reflejada, daría lugar a una ola resultante igual a la ola incidente, mientras que una pared totalmente reflejante que no absorbería energía daría lugar a una resultante igual a un tren de ondas estacionario con una altura de ola igual al doble de la ola incidente.

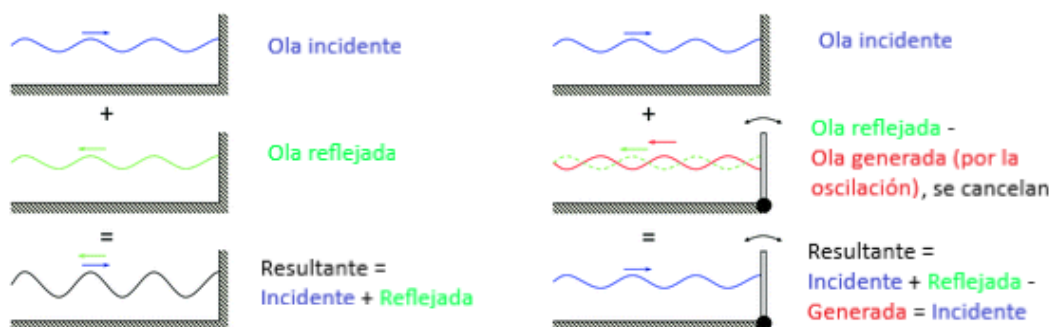


Figura 5. Mecanismo de captura de la energía del oleaje.

El mecanismo de absorción de energía undimotriz explicado implica además que, al reducirse la onda resultante, pueden mejorarse las condiciones de navegación en puertos que cuenten con estos sistemas instalados en sus diques, especialmente en el caso de diques verticales cuyos coeficientes de reflexión son muy altos y además se reduce la altura de la ola a pie de dique para algunos periodos.

Los dispositivos de columna de agua oscilante, conocidos por sus siglas en inglés como OWC (*Oscilating Water Column*), consisten en una estructura que cuenta con una cámara o columna con una apertura en su parte inferior que permite el paso del flujo de agua inducido por el oleaje y una en su parte superior por la cual pasa el flujo de aire generado por la oscilación del nivel de agua, tal y como se muestra en la Figura 6. En esta apertura superior se coloca el dispositivo PTO, que turbinará el aire a su paso, generando la energía eléctrica.

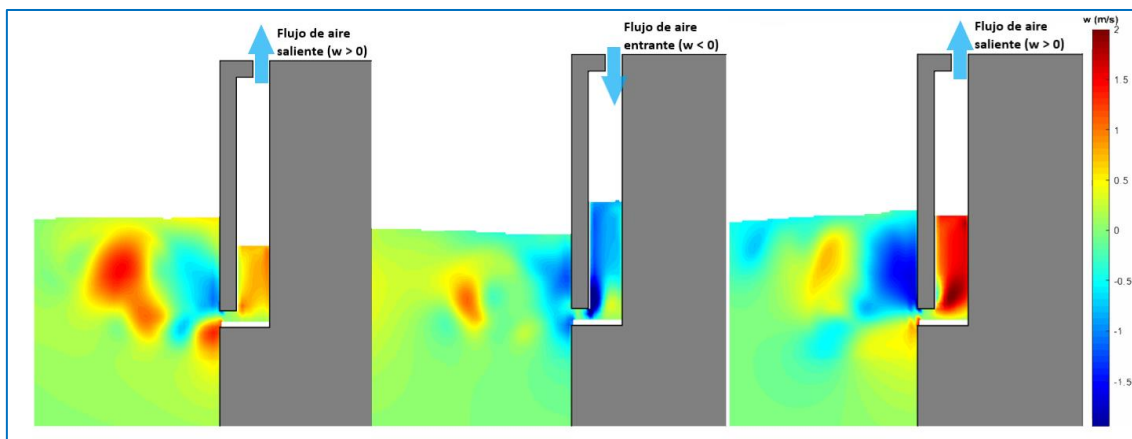


Figura 6. Oscilación de agua dentro de la OWC y dirección del flujo de aire turbinado.

En los sistemas OWC, se da una complicación de cara a la extracción de energía debida a la bidireccionalidad del flujo de aire que ha de ser turbinado, el cual genera importantes daños por fatiga en los elementos rotatorios. Para solventar estas complicaciones se puede optar por válvulas de no retorno a modo de rectificador del flujo, si embargo, estas válvulas requieren un mantenimiento costoso. La solución generalmente adoptada para los dispositivos PTO es el uso de turbinas auto rectificadoras del flujo, es decir, que giran en un único sentido independientemente de la dirección del flujo. Las dos tipologías de uso más extendido son las turbinas Wells (Figura 7) y las turbinas de impulsión (Figura 8).

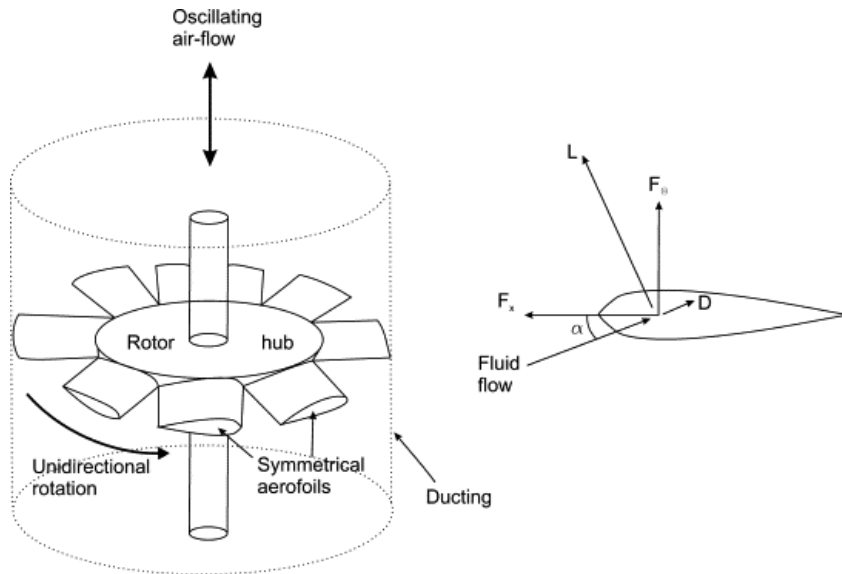


Figura 7. Esquema de funcionamiento de una turbina Wells. Obtenido en: *Comparison of LIMPET contra-rotating wells turbine with theoretical and model test predictions* [11].

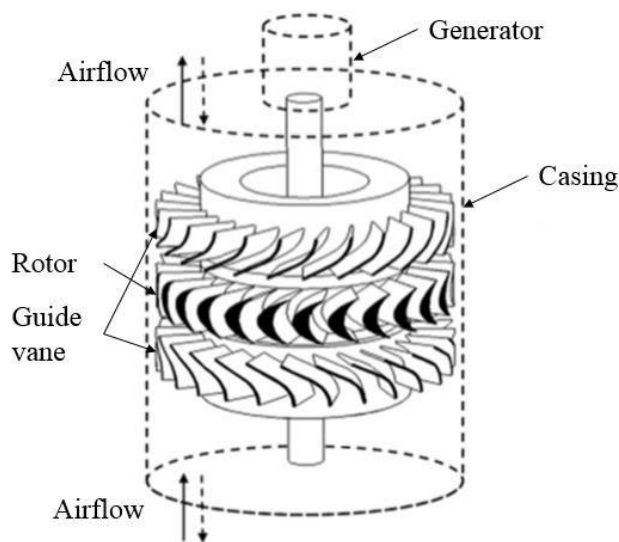


Figura 8. Esquema de funcionamiento de una turbina de impulsión. Obtenido en: *Performance comparison of turbines for bi-directional flow* [10].

Las turbinas tipo Wells son las más sencillas, contando con álabes simétricos cuya forma provoca una resultante en el mismo sentido independientemente de la dirección del flujo. Estas turbinas tienen la desventaja de no ser capaces de iniciarse por sí mismas, si no que necesitan un aporte de energía para comenzar a rotar; también tienen la desventaja de que, dada su alta velocidad de operación, pueden provocar problemas de ruidos.

La problemática asociada a la incapacidad de iniciar su giro por sí mismas en las turbinas Wells queda solventada en las turbinas de impulsión, que cuentan con una serie de toberas en su estator que guían el flujo en dirección tangencial los álabes del rotor, que con su forma cóncava giran en una dirección única por conservación de la cantidad de movimiento.

En cuanto al rendimiento de las turbinas, este depende del llamado coeficiente de flujo, que relaciona la componente axial de la velocidad del flujo (C_x) con la velocidad de rotación de los álabes de la turbina (U):

$$\phi = \frac{C_x}{U} \quad (1)$$

Tal y como se puede observar en la Figura 9, estas dos tipologías de turbina presentan importantes diferencias ya que la turbina tipo Wells ofrece mayores rendimientos a bajos coeficientes de flujo y para una franja estrecha, mientras que las turbinas de impulsión cubren un amplio rango de coeficientes de flujo, pero cuando este es bajo, su rendimiento se ve comprometido.

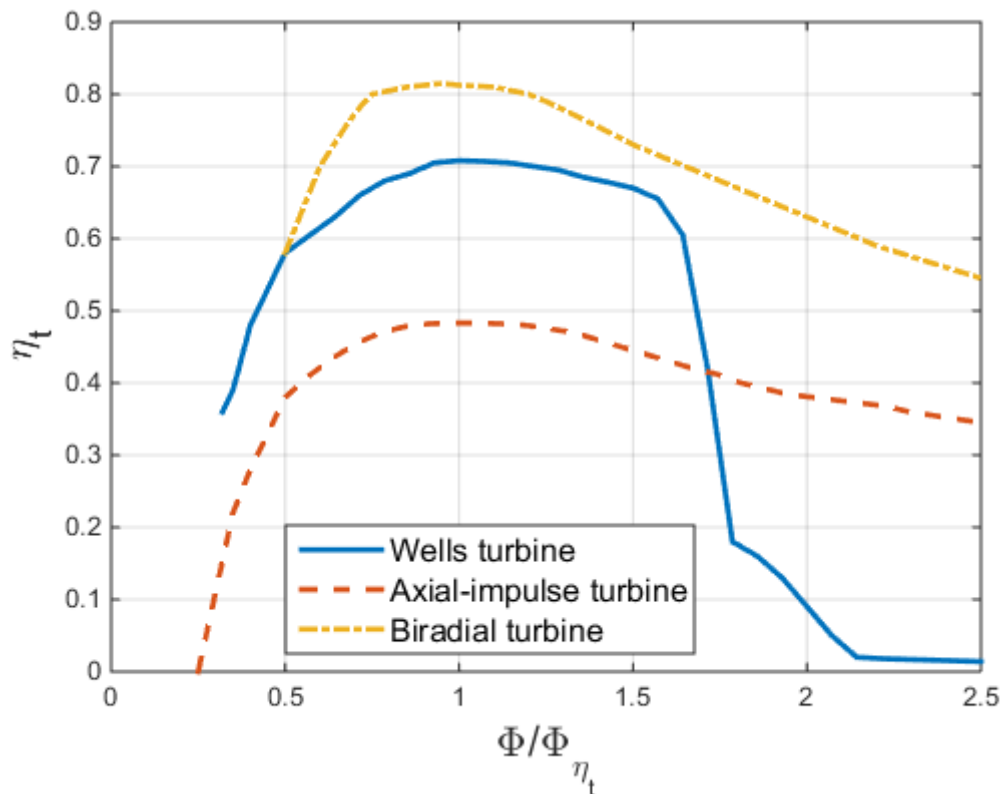


Figura 9. Comparativa de rendimientos en base al ratio de coeficiente de flujo (ϕ) frente a coeficiente de flujo óptimo (ϕ_{η}). Obtenido en [15].

2.2. Diques verticales

2.2.1. Descripción de la tipología

La tipología de dique a diseñar se encuentra enmarcada en lo que en la ROM 1.0-09 [3] se define como dique vertical con paramento especial, que en este caso contará con una cámara de oscilación, en la que se desarrollarán los mecanismos anteriormente mencionados, reduciendo la reflexión del oleaje en comparación con un dique vertical convencional.

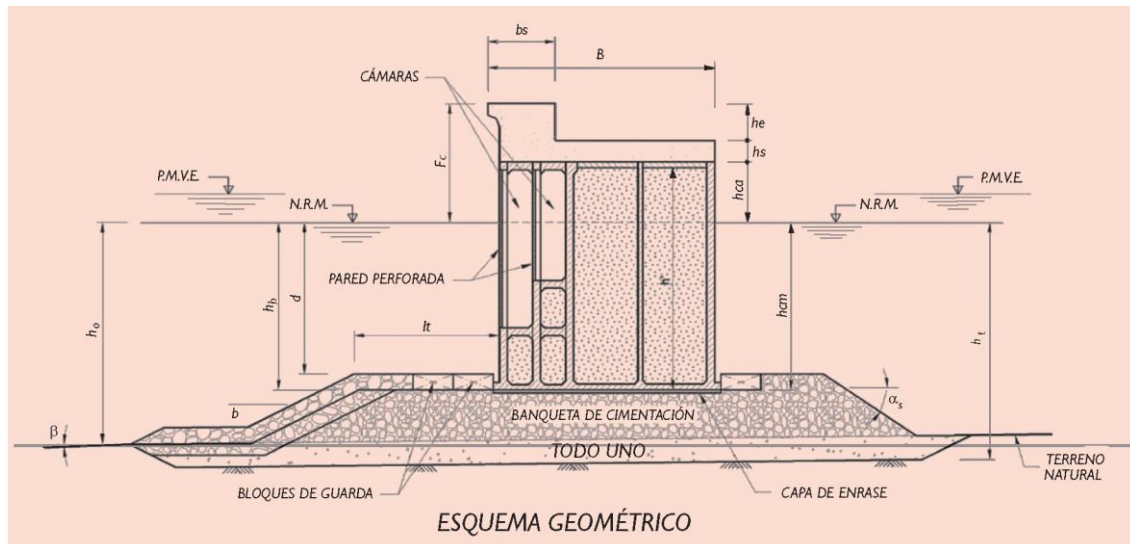


Figura 10. Sección de un dique vertical con cámara disipadora y resonante. Obtenido en: ROM 1.0-09 [3].

Los diques verticales, generalmente, se construyen a partir de cajones de hormigón apoyados sobre una banqueta de cimentación de material granular con una berma de protección de escollera. Dependiendo de la altura de esta escollera se puede considerar que el dique es vertical o mixto, siendo este segundo un dique con una banqueta de cimentación a una altura (d) tal que para la profundidad del lecho (h) se cumpla que:

$$\frac{d}{h} \geq 0,85 \quad (2)$$

A menudo se opta por colocar un bloque de hormigón de grandes dimensiones en el pie del cuerpo central del dique, el llamado bloque de guarda, que protege esta zona contra la socavación.

En comparación con la tipología de los diques en talud, los diques verticales presentan las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Consume una cantidad de material y de espacio mucho menor, ventaja que se agrava con respecto se aumente la profundidad de cimentación del dique.
- Al construirse con elementos prefabricados, su construcción es mucho más rápida y genera menos turbidez en la zona.
- Su rápida construcción reduce los riesgos durante la construcción.
- La construcción del cuerpo central se ejecuta en tierra permitiendo un acabado superior.
- Se reduce el mantenimiento necesario para la estructura, con su consecuente reducción de costes.

Desventajas:

- Son especialmente sensibles a la rotura del oleaje contra el paramento, dado que por su geometría son sensibles al vuelco, esto los convierte en contraindicados para profundidades en las que se pueda generar rotura del oleaje.

- En el caso de diques verticales convencionales los índices de reflexión resultan cercanos a la unidad, siendo menores en el caso de los diques con cámara disipadora o resonante.
- El propio método constructivo que requiere una maquinaria y mano de obra específica.
- El proceso de fondeado de los cajones en su posición final presenta posibles problemáticas, que limitan las condiciones climáticas de velocidad de viento, de corriente y oleaje.

2.2.2. Proceso constructivo

El proceso constructivo de los diques verticales ejecutados mediante fondeo de cajones es el siguiente:

1. **Dragado:** se ha de retirar el terreno natural hasta alcanzar estratos suficientemente competentes en la zona donde se ejecutará la banqueta de cimentación.
2. **Colocación de la banqueta de cimentación:** usualmente, se ejecuta por vertido desde gánguiles de apertura de fondo. El núcleo se ejecuta en “todo en uno” de cantera y sobre él se coloca un filtro de escollera.
3. **Enrase de la banqueta de cimentación:** el material de la banqueta de cimentación ha de ser nivelado a la cota deseada y ha de conseguirse el acabado deseado para que no se generen movimientos indeseados durante el posterior fondeo de los cajones.
4. **Fabricación de cajones:** la fabricación de los cajones (Figura 11) se puede superponer en el tiempo con las anteriores fases, para no aumentar la duración de la obra. Esta fabricación se lleva a cabo en cajoneros, mediante encofrado deslizante, en los que se comienza por la ejecución de la zapata para después llevar a cabo el encofrado de una parte del cuerpo del cajón, hormigonarlo y sumergir la sección una vez alcance el nivel de fraguado deseado.

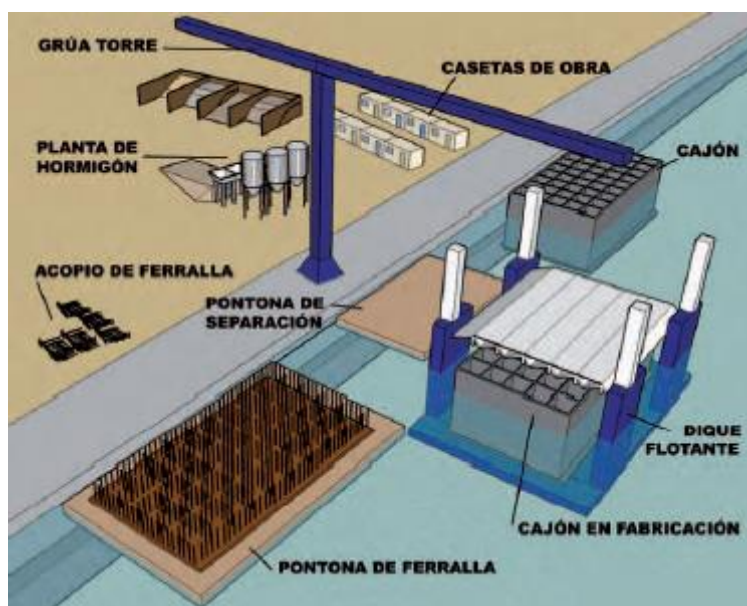


Figura 11. Proceso de ejecución de cajones. Obtenido en: <http://ycivilengineering.blogspot.com/2012/08/ingenieria-maritima-y-costera.html>.

5. **Transporte de cajones:** una vez fabricados los cajones, estos han de ser transportados hasta su destino. Este transporte se lleva a cabo por medios marinos, botándolos y remolcándolos hasta el lugar deseado.
6. **Fondeo de cajones:** consiste en lastrar el cajón de forma paulatina y controlada, para colocar este en su posición final sobre la banqueta de cimentación. Este lastrado se lleva a cabo mediante la inundación de las celdas, pudiéndose realizar de forma asimétrica para mantener la estabilidad y controlando la velocidad de llenado para evitar el deslizamiento del cajón sobre la banqueta. Esta operación resulta especialmente delicada, dado que, por las dimensiones y geometría de los cajones, estos son sensibles a las acciones de viento, oleaje y corriente.
7. **Relleno de celdas:** el relleno de las celdas se puede llevar a cabo por medios terrestres, sustituyendo el agua de lastrado por material granular de unas características concretas, que dotará al cajón de peso para estabilizarlo frente al vuelco y deslizamiento además de aumentar su resistencia estructural.
8. **Colocación de la berma de protección y bloque de guarda:** la colocación de los bloques de guarda ha de realizarse tras el fondeo con la mayor celeridad posible, para proteger la estructura contra los efectos de socavación, generalmente con medios terrestres. Posteriormente se ejecutará la berma de protección de escollera.
9. **Ejecución del espaldón y superestructura:** se ejecutan al abrigo del dique mientras las condiciones de rebase permitan los trabajos.

2.3. Métodos de cálculo

Para evaluar los diferentes modos de fallo y de parada operativa se establecen diferentes niveles de metodología:

- **Métodos de Nivel I:** se trata de métodos deterministas, que no aportan información sobre la probabilidad de fallo de la estructura, considerando que la obra no falla mientras que exista cierto margen entre el valor de la resistencia y de la acción, es decir, mientras exista un coeficiente de seguridad lo suficientemente alto. Este coeficiente de seguridad se obtiene del análisis de los diferentes estados límite y se obtiene de forma independiente para cada elemento de la obra, considerando que el conjunto falla cuando lo hace cualquiera de sus elementos. Se enmarcan pues, dentro de esta metodología, los métodos de coeficiente global y de coeficientes parciales.
- **Métodos de Nivel II y III:** estos métodos, de carácter probabilista, consideran que tanto las acciones actuantes sobre la estructura como la resistencia de esta son variables y se ajustan a una determinada distribución probabilística, con lo que el fallo de la estructura se ajusta también a una función de densidad de probabilidad.
 - **Nivel II:** los métodos de nivel II consisten en la linealización de la ecuación de verificación, es decir, consideran una función de distribución de probabilidad normal para todas las acciones y resistencias. Se conocen también como aproximación de primer orden o lineal.
 - **Nivel III:** se diferencian de los métodos de nivel II en que considera las funciones de densidad de probabilidad reales de cada variable, valiéndose de análisis basados en el algoritmo de Monte Carlo, con lo que aumenta su coste computacional.

La elección del método de cálculo se puede hacer en base a los criterios establecidos en la ROM 0.0-01 [1].

3. Criterios de diseño del dique vertical

Los criterios de diseño para el cálculo del dique vertical han sido obtenidos conforme a las indicaciones de las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM), publicadas por Puertos del Estado.

El carácter general de la obra será utilizado a posteriori para definir la probabilidad de fallo de conjunta de la obra, así como la vida útil mínima y el método de verificación recomendado.

3.1. Buque de proyecto

La ROM 3.1-99 [4] define el buque de proyecto como *“el buque o conjunto de buques que se utilizarán para el dimensionamiento de los accesos y áreas de flotación”*, se han de precisar los siguientes parámetros:

- **Eslora total (L):** Distancia entre los más alejados del buque en sentido longitudinal, es decir, entre proa y popa.
- **Eslora entre perpendiculares (L_{pp}):** Distancia entre dos perpendiculares, una de ellas ubicada en la intersección de la línea de flotación con el canto de la proa y otra que puede considerarse en la intersección de la línea de flotación con la mecha del timón, el contorno de la popa o con el codaste, que es la pieza en que acaba la quilla.
- **Manga (B):** Distancia máxima entre los puntos más alejados en el sentido transversal, es decir, entre babor y estribor.
- **Calado (D):** Distancia vertical entre la línea de flotación y la parte inferior del casco.
- **Francobordo (F):** Distancia vertical entre la línea de cubierta y la línea de flotación.
- **Puntal (T):** Distancia vertical entre la línea de cubierta y la parte inferior del casco.

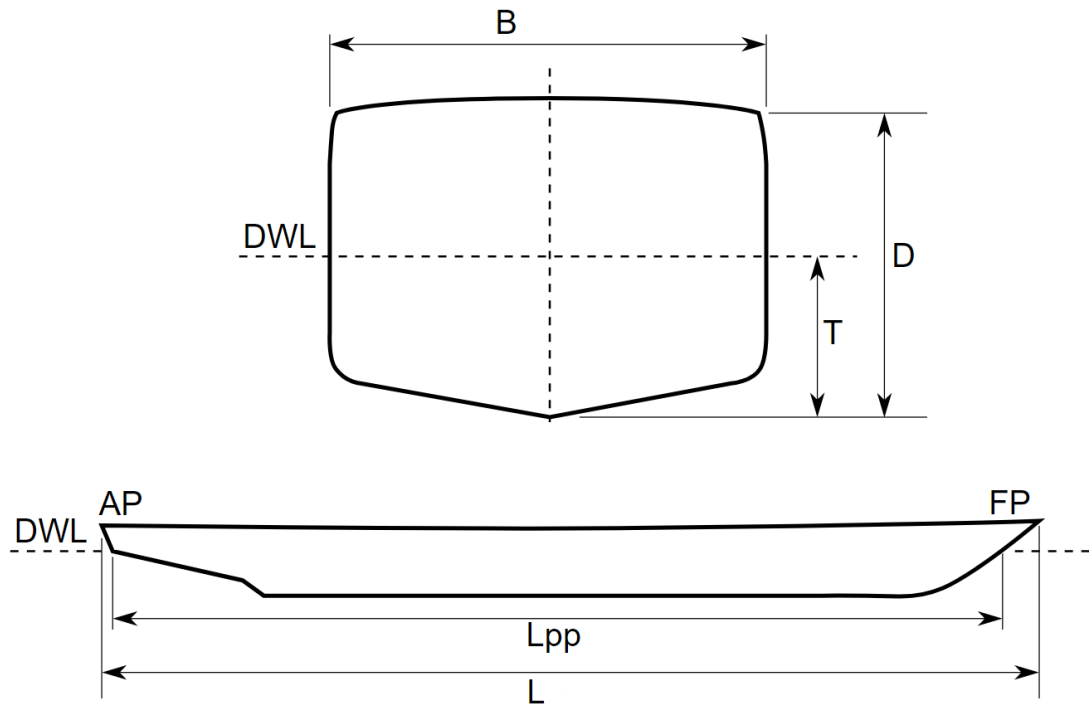


Figura 12. Sección longitudinal y transversal del buque. Obtenido en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Calado_\(n%C3%A1utica\)#/media/Archivo:Ship_main_dimensions.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Calado_(n%C3%A1utica)#/media/Archivo:Ship_main_dimensions.svg).

- **Tonelaje de peso muerto (TPM):** Peso de la carga útil máxima, considerando el combustible, la tripulación y todos los materiales necesarios para la navegación., expresado en toneladas métricas.
- **Desplazamiento a plena carga (Δ):** Peso del buque con su carga máxima, considerando también el peso del propio buque en vacío, que equivale al peso del volumen de agua desplazado.

Para el caso del Puerto de Alicante, el buque tipo de proyecto adoptado se ha definido a partir de los buques de mayor eslora y de mayor calado que han efectuado su entrada:

Tabla 1. Características del buque de diseño.

Tipo de buque	TPM (t)	Eslora total (L)	Manga (B)	Calado (D)	Desplazamiento a plena carga (Δ)
Crucero	7900	293	42,3	9,0	99526
Carguero	81039	229	32,0	14,5	43278

3.2. Tramificación de la obra

La tramificación de la obra consiste en dividir la misma en conjuntos de partes que cumplen una misma función, compartiendo una única tipología estructural y bajo estados de cargas similares.

En este caso no se requiere una división de la obra, ya que toda ella se trata de una ampliación con una tipología de dique vertical con un dispositivo OWC instalado, estando el resto del dique construido con posterioridad.

3.3. Carácter general de la obra

Se detalla a continuación la determinación del carácter general del proyecto, conforme a la ROM 0.0-01 [1].

El carácter general de la obra valora la importancia, repercusión socioambiental y repercusión económica del tramo estudiado, a través de los índices correspondientes. Conocidos estos índices, se obtiene una recomendación de la vida útil mínima, así como de la máxima probabilidad conjunta de fallo a lo largo de la vida útil para los estados límite últimos (ELU) y estados límite de servicio (ELS).

3.3.1. Índice de Repercusión Económica (IRE)

Este índice constituye un parámetro adimensional que valora cuantitativamente las repercusiones económicas en el caso de reconstrucción de la obra (C_{RD}) y de detención de las actividades económicas que la obra permite (C_{RI}), adimensionalizando estas cuantías con el parámetro económico de adimensionalización (C_0), tal y como se muestra en la ecuación:

$$IRE = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_0} \quad (3)$$

El valor del parámetro económico de adimensionalización depende de la economía del país en el que se ejecuta la obra, la cual varía además con el tiempo. La ROM 0.0-01 [1] indica que, para España y para el año horizonte en el que se valoran los costes C_{RD} y C_{RI} , el valor a adoptar es **$C_0 = 3 \text{ M€}$** .

La repercusión económica de la reconstrucción de la obra a estudiar ha sido estimada a partir del coste de obras de características similares, adoptándose pues un valor aproximado de **$C_{RD} = 15 \text{ M€}$** .

Dada la complejidad que alberga la determinación de la repercusión económica provocada por el cese de las actividades directamente relacionadas con la obra, se ha optado por utilizar la evaluación aproximada del cociente C_{RI}/C_0 propuesta en el Anejo del Capítulo 2 de la ROM 0.0-0.1 [1]:

$$\frac{C_{RI}}{C_0} = C * (A + B) \quad (4)$$

Donde:

- A es el coeficiente de ámbito del sistema, que toma los valores:
 - Local, **$A = 1$** .
 - Regional, **$A = 2$** .
 - Nacional o internacional, **$A = 5$** .

- B es el coeficiente de la importancia estratégica:
 - Irrelevante, B = 0.
 - Relevante, **B = 2**.
 - Esencial, B = 5.
- C es el coeficiente de la importancia económica:
 - Irrelevante, C = 0.
 - Relevante, **C = 1**.
 - Esencial, C = 2.

De esta forma se ha obtenido un valor del coeficiente C_{RI}/C_0 :

$$\frac{C_{RI}}{C_0} = 1 * (2 + 2) = 4 \quad (5)$$

Obteniéndose finalmente un IRE de:

$$IRE = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_0} = \frac{C_{RD}}{C_0} + \frac{C_{RI}}{C_0} = \frac{15}{3} + 4 = 9 \quad (6)$$

El valor del IRE enmarca la obra en uno de los siguientes intervalos de repercusión económica:

Tabla 2. Clasificación en función del IRE.

Subintervalo	Repercusión	Condición
R₁	Baja	$IRE \leq 5$
R₂	Media	$5 < IRE \leq 20$
R₃	Alta	$IRE > 20$

Con lo que la obra analizada, con un valore de **IRE = 9**, queda enmarcada en la clasificación de obras de repercusión económica “**R₂, media**”.

3.3.2. Índice de Repercusión Social y Ambiental (ISA)

Por otra parte, el ISA valora cualitativamente las repercusiones socioambientales provocadas por una hipotética destrucción o pérdida de operatividad de la obra estudiada. Esta valoración se basa en la suma de tres subíndices:

$$ISA = \sum_{i=1}^3 ISA_i \quad (7)$$

Donde los tres subíndices que componen el ISA son:

- ISA₁ es el subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas:
 - Remoto: daño a personas improbable, ISA₁ = 0.
 - Bajo: posibles pero improbables y reducidas pérdidas de vidas humanas, **ISA₁ = 3**.
 - Alto: posibles y muy probables pérdidas de vidas humanas, pero de un reducido número de personas, ISA₁ = 10.



- Catastrófico: daños a personas y pérdidas de vidas lo suficientemente graves como para afectar a la capacidad de respuesta a nivel regional, $ISA_1 = 20$.
- ISA_2 es el subíndice de daños en el medioambiente y en el patrimonio histórico-artístico:
 - Remoto: daños al patrimonio o ambiente improbables, $ISA_2 = 0$.
 - Bajo: pérdidas de elementos de valor reducido o daños leves, reversibles en un plazo de un año, $ISA_2 = 2$.
 - Medio: pérdidas de elementos de valor significativo o daños importantes, reversibles en un plazo de cinco años, $ISA_2 = 4$.
 - Alto: pérdidas de elementos de gran importancia o daños al ecosistema de carácter irreversible, $ISA_2 = 8$.
 - Muy alto: pérdida de un elevado número de elementos importantes del patrimonio, de espacios naturales protegidos o daños irreversibles al ecosistema que conlleven la extinción de alguna especie considerada como protegida, $ISA_2 = 15$.
- ISA_3 es el subíndice de alarma social:
 - Bajo: alarma social no significativa, $ISA_3 = 0$.
 - Medio: alarma social asociada a valores de ISA_1 e ISA_2 “alto”, $ISA_3 = 5$.
 - Alto: alarma social asociada a valores de ISA_1 “catastrófico” e ISA_2 “muy alto”, $ISA_3 = 10$.
 - Máxima: alarma social máxima, $ISA_3 = 15$.

Obteniéndose finalmente un IRE de:

$$ISA = \sum_{i=1}^3 ISA_i = 3 + 2 + 0 = 5 \quad (8)$$

El valor del ISA enmarca la obra en uno de los siguientes intervalos de repercusión social y ambiental:

Tabla 3. Clasificación en función del ISA.

Subintervalo	Repercusión	Condición
S_1	Significativa	$ISA < 5$
S_2	Baja	$5 \leq ISA \leq 20$
S_3	Alta	$20 \leq ISA < 30$
S_4	Muy alta	$ISA \geq 30$

Con lo que la obra analizada, con un valor de **ISA = 5** queda enmarcada en la clasificación de obras de repercusión social y ambiental “**S₂, baja**”.

3.3.3. Vida útil y probabilidad de fallo conjunta

Siguiendo pues la metodología de la ROM 0.0-0.1 [1], se pueden tomar como valores de la vida útil mínima (V_m) los mostrados en la siguiente tabla en función del IRE anteriormente calculado.

Tabla 4. Vida útil mínima propuesta por la ROM 0.0-01 en función del IRE.

IRE	V_m [años]
≤ 5	15
6 – 20	25
> 20	50

Con lo que la vida útil adoptada para el cálculo del dique vertical es de $V_m = 25$ años.

Por otra parte, la máxima probabilidad conjunta de fallo para los ELU ($P_{f,ELU}$) y para los ELS ($P_{f,ELS}$) se obtienen a partir del ISA a partir de la siguiente tabla.

Tabla 5. Máximas probabilidades conjuntas de fallo propuesta por la ROM 0.0-01 en función del ISA.

ISA	$P_{f,ELU}$ [%]	$P_{f,ELS}$ [%]
< 5	20	20
5 - 19	10	10
20 - 29	1	7
≥ 30	0.01	7

Con lo que la probabilidad de fallo máxima adoptada para el cálculo del dique vertical es de $P_{f,ELU} = 10\%$ para el ELU y de $P_{f,ELS} = 10\%$ para el ELS.

3.3.4. Método de verificación

La ROM 0.0-0.1 [1] propone los siguientes métodos de cálculo y verificación de las obras a analizar:

- Métodos de Nivel I:
 1. Coeficiente de seguridad global.
 2. Coeficientes parciales.
- Métodos de Nivel II:
 3. Momentos estadísticos y técnicas de optimización.
- Métodos de Nivel III:
 4. Integración y simulación numérica.

Tabla 6. Método de verificación propuesto por la ROM 0.0-01 en función del ISA e IRE.

		ISA			
		S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
IRE	R ₁	[1]	[2]	[2] y [3] o [4]	[2] y [3] o [4]
	R ₂	[2]	[2]	[2] y [3] o [4]	[2] y [3] o [4]
	R ₃	[2] y [3] o [4]	[2] y [3] o [4]	[2] y [3] o [4]	[2] y [3] o [4]

Con lo que el método de verificación recomendado es el “[2] coeficientes parciales”.

3.4. Carácter operativo de la obra

El carácter operativo de la obra representa el impacto que genera su parada operativa o reducción del nivel de operatividad de esta.

3.4.1. Índice de Repercusión Económica Operativo (IREO)

Los costes generados por la parada operativa de la obra se pueden estimar, de manera cualitativa, de la siguiente forma:

$$IREO = F \times (D + E) \quad (9)$$

Donde:

- F es el coeficiente de adaptabilidad de la demanda y el entorno económico a la parada:
 - Adaptabilidad alta, F = 0.
 - Adaptabilidad media, **F = 1**.
 - Adaptabilidad baja, F = 3.
- D es el coeficiente de simultaneidad:
 - Periodos no simultáneos, **D = 0**.
 - Periodos simultáneos, D = 5.
- E es el coeficiente de intensidad de la demanda durante la parada:
 - Poco intensivo, E = 0.
 - Intensivo, **E = 3**.
 - Muy intensivo, E = 5.

Con lo que el IREO resulta.

$$IREO = 1 \times (0 + 3) = 3 \quad (10)$$

Según el valor obtenido, se clasifica en los siguientes grupos:

Tabla 7. Clasificación en función del IREO.

Subintervalo	Repercusión	Condición
R _{Q1}	Baja	IREO < 5
R _{Q2}	Media	5 ≤ IREO ≤ 20
R _{Q3}	Alta	IREO > 20

Con lo que, para el valor de **IREO = 3**, la obra pertenece a la clasificación de repercusión económica operativa “**R_{Q1}, baja**”.

3.4.2. Índice de Repercusión Social y Ambiental Operativo (ISAO)

De manera similar, este índice hace referencia al impacto social y ambiental por parada operativa o pérdida de operatividad, de manera cualitativa, siguiendo la siguiente formulación:

$$ISAO = \sum_{i=1}^3 ISAO_i \quad (11)$$

Donde los valores de los índices ISAO_i se pueden considerar, a falta de más datos, con la misma metodología que los de la formulación del ISA. En este caso, como ocurre con varias tipologías de obra, el valor del ISAO es nulo, ya que su parada operativa no provoca impactos significativos sobre la sociedad o el medioambiente.

Tabla 8. Clasificación en función del ISAO.

Subintervalo	Repercusión	Condición
S _{Q1}	Significativa	ISAO < 5
S _{Q2}	Baja	5 ≤ ISAO ≤ 20
S _{Q3}	Alta	20 ≤ ISAO < 30
S _{Q4}	Muy alta	ISAO ≥ 30

Así pues, para el valor **ISAO = 0**, la obra queda clasificada en cuanto a su repercusión socioambiental como “**S_{Q1}, significativa**”.

3.4.3. Condiciones de operatividad del buque

Se ha de establecer un valor mínimo del nivel de operatividad de la obra o tramo, es decir, el porcentaje de tiempo mínimo en el que la obra ha de cumplir las condiciones de operatividad.

Es posible establecer un nivel mínimo de operatividad en función del IREO, acorde con la ROM 0.0-01 [1], como se muestra en la

Tabla 9. Para el caso estudiado se establece una operatividad mínima de **r_{f,ELO} = 0.85**.

Tabla 9. Operatividad mínima.

IREO	≤ 5	6 – 20	> 20
Operatividad, r _{f,ELO}	0,85	0,95	0,99

El número medio anual de ocurrencias del modo parada operativa se limita en función del ISAO según se indica en la Tabla 10, que para la obra que concierne a este estudio resulta $N_m = 10$.

Tabla 10. Máximo número medio de paradas anuales.

ISAO	< 5	5 - 19	20 - 29	≥ 30
Número, N_m	10	5	2	0

Finalmente, se establece una duración máxima del estado de para operativa en función tanto del ISAO como del IREO, tal y como indica la Tabla 11. Con los valores obtenidos para ambos índices, la duración máxima de parada se establece en **24 horas**.

Tabla 11. Duración máxima de parada, expresada en horas.

IREO	ISAO			
	< 5	5 - 19	20 - 29	≥ 30
≤ 5	24	12	6	0
6 - 20	12	6	3	0
> 20	6	3	1	0

4. Estudio de batimetría y clima marítimo

En el presente capítulo se presentará el análisis realizado sobre la batimetría y clima marítimo, necesarios para el posterior diseño tanto del dique vertical como de la columna de agua oscilante.

4.1. Batimetría

Tal y como se comentó anteriormente, la zona de implantación es el extremo del dique del muelle de poniente del Puerto de Alicante (Figura 13), donde se registran profundidades de 15m que presentan una pendiente suave hacia barlomar en dirección perpendicular al dique, de un 4 %.

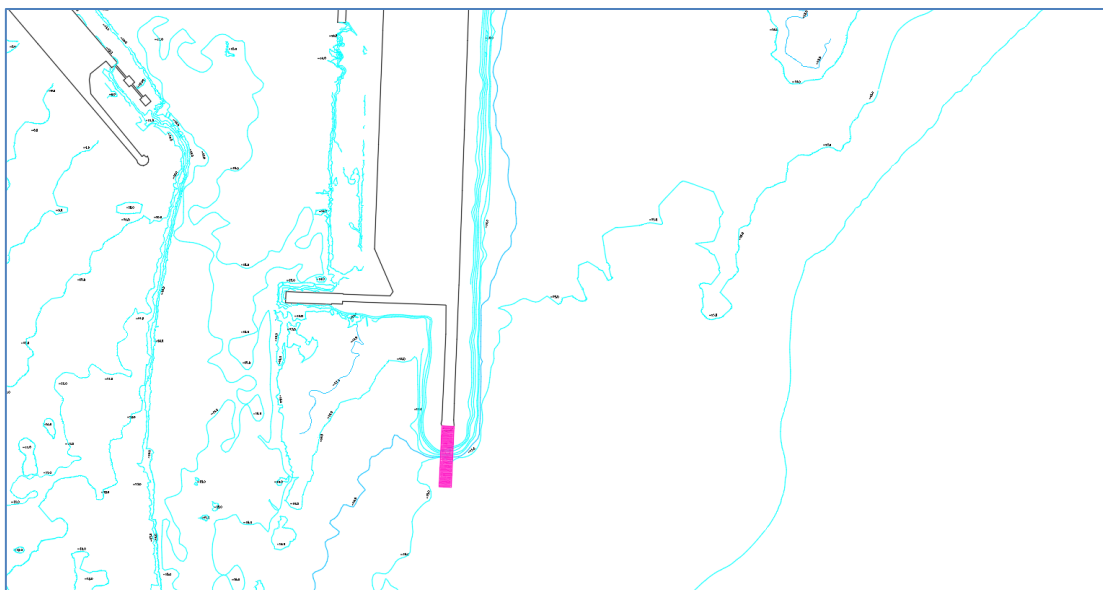


Figura 13. Batimetría de la zona de estudio.

En cuanto al fondo marino del puerto, está compuesto mayoritariamente por arenas, encontrándose en algunas zonas una capa de fangos de pocos metros de espesor. En la zona de implantación, la cimentación se realizará directamente sobre las arenas.

4.2. Clima marítimo

EL estudio del clima marítimo se ha realizado a partir de los datos DOW (*Downscaled Ocean Waves*), GOT (*Global Ocean Tides*) y GOS (*Global Ocean Surges*), facilitados por el IH Cantabria, que consisten en un total de 592416 datos de las alturas significantes de ola y marea meteorológica, respectivamente, que han sido determinadas horariamente a lo largo de un total de 67,63 años.

La base de datos GOS procede de un reanálisis realizado de las mareas meteorológicas horarias, validado por multitud de mareógrafos del Organismo Público Puertos del Estado. De forma similar, se ha obtenido la base de datos GOT de mareas astronómicas horarias a nivel global.

La base de datos DOW surge de una generación de oleaje y su propagación con métodos numéricos combinada con técnicas avanzadas de estadística para el filtrado e interpolación de datos. Los resultados han sido ampliamente contrastados con una gran cantidad de boyas, tanto en aguas abiertas como en zonas costeras.

Para la propagación del oleaje se utilizó el modelo numérico SWAN junto con los espectros de oleaje obtenidos en alta mar mediante un reanálisis que ha sido calibrado con mediciones vía satélite, además se han utilizado los vientos obtenidos del reanálisis SeaWind-NCEP para forzar el modelo, dando un resultado más real.

Así pues, los datos del punto DOW utilizado son los siguiente:

- **Longitud:** 0°29'40.20"O
- **Latitud:** 38°19'6.60"N
- **Tiempo de medición:**
- **Resolución:** 10 x 10 km

Las coordenadas se corresponden a un punto situado a unos 50 metros del morro del dique, con lo que dada la cercanía y dado que el estudio se realiza en el extremo del

dique, donde las profundidades son considerables y no hay presencia de elementos que alteren el oleaje, no ha sido necesaria la realización de una propagación de oleaje, si no que sea considerado que mantiene sus características

Representando los datos en la rosa de oleaje (Figura 14), donde se muestra la dirección en la cual avanza el frente de ola, se observa que el oleaje es prácticamente unidireccional concentrándose en un mismo sector y con la práctica totalidad de las tormentas llegando en dirección SSW, es decir, vienen desde la dirección ENE con lo que el análisis se realizará considerando un oleaje unidireccional, que en este caso será además perpendicular al dique estudiado.

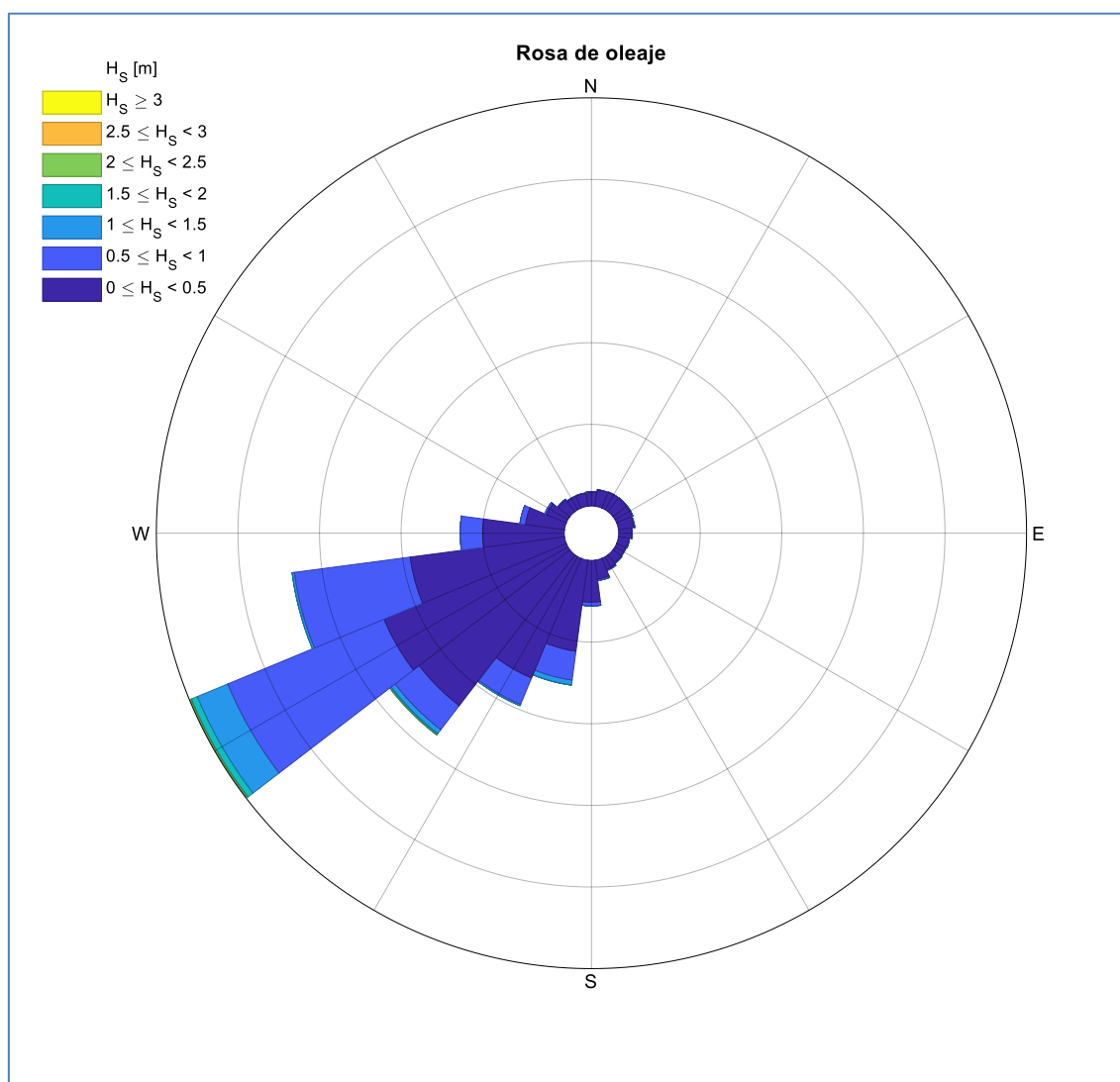


Figura 14. Rosa de oleaje resultante de los datos DOW.

Para el estudio del régimen extremal, se ha realizado un análisis de Máximos Relativos Sobre el Umbral, también conocido por sus siglas en inglés como POT (*Peak Over Threshold*), desarrollado por Goda en 1988 y que consiste en estudiar por separado las tormentas individuales evitando que se produzca una interdependencia entre ellas. Esta discriminación se consigue definiendo las tormentas como aquellas series que superen una altura de ola umbral en su pico temporal, siendo las alturas máximas de los citados temporales la muestra a utilizar para la obtención del régimen extremal. En la ROM 0.3-

91 [2] se establecen dos umbrales diferentes, siendo el primero el utilizado para la definición de las tormentas, pero utilizando el segundo, del mayor valor, como muestra de estudio.

Para la zona d estudio, el primer umbral se ha considerado de 1,00m al igual que hacen las recomendaciones, sin embargo, se ha observado que siguiendo el procedimiento utilizado en la ROM 0.3-91 [2], en el cual toma un valor de 2,00m como altura de ola umbral, la tendencia de los valores extremos no es homogénea y el ajuste a la función GEV (*General Extreme Values*) resulta impreciso. Esta imprecisión queda subsanada al aumentar el valor umbral a los 2,25m, tal y como se puede observar en la Figura 15. Además, estudiando los espaciamientos entre temporales y sus duraciones, se ha observado que se generaron lecturas de temporales de muy corta duración y seguidas al encontrarse algunos temporales en el límite del umbral, reduciendo la duración media de los temporales de forma considerable.

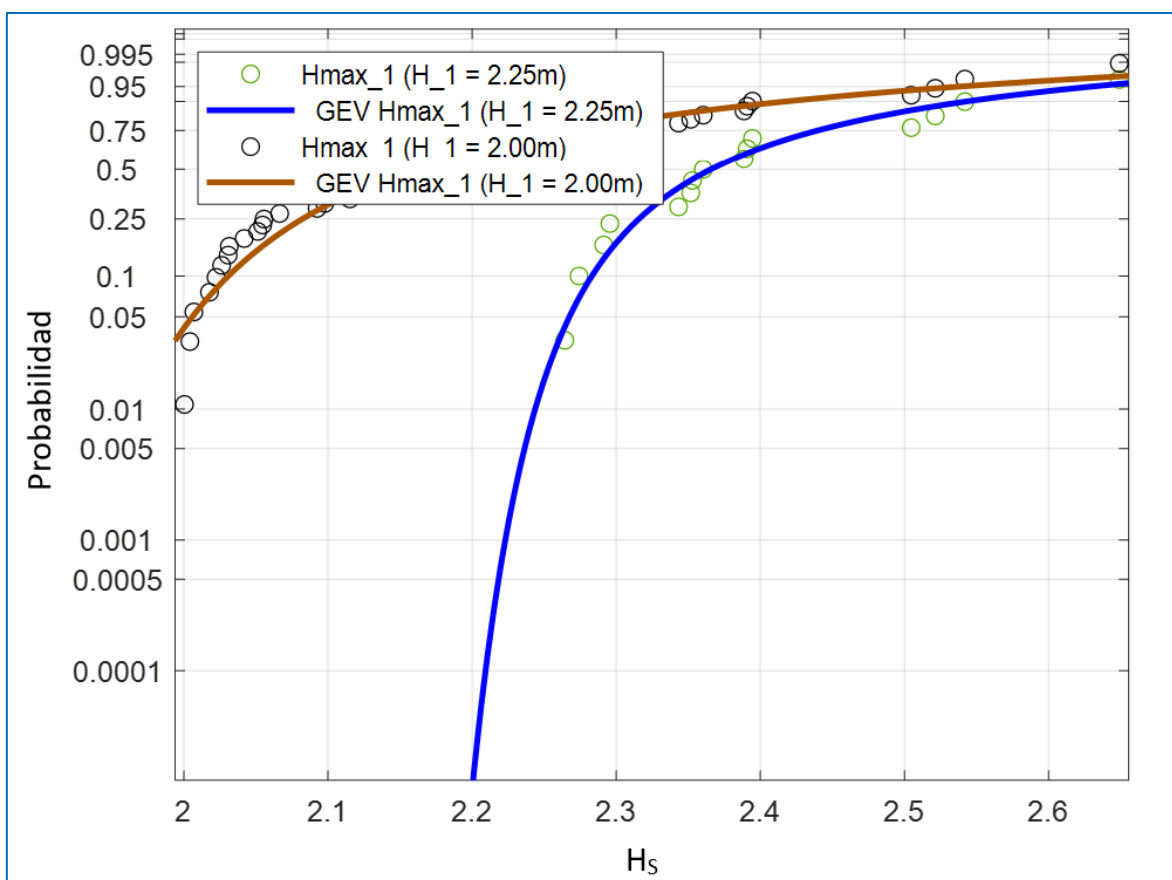


Figura 15. Comparación de ajuste de la función GEV para los umbrales de 2.00m (en marrón) y 2.25m (en azul).

También se han comparado los resultados del análisis POT con los obtenidos llevando a cabo un análisis de máximos anuales que, a la vista de los resultados obtenidos (Figura 16), presenta una tendencia diferente para los valores más bajos.

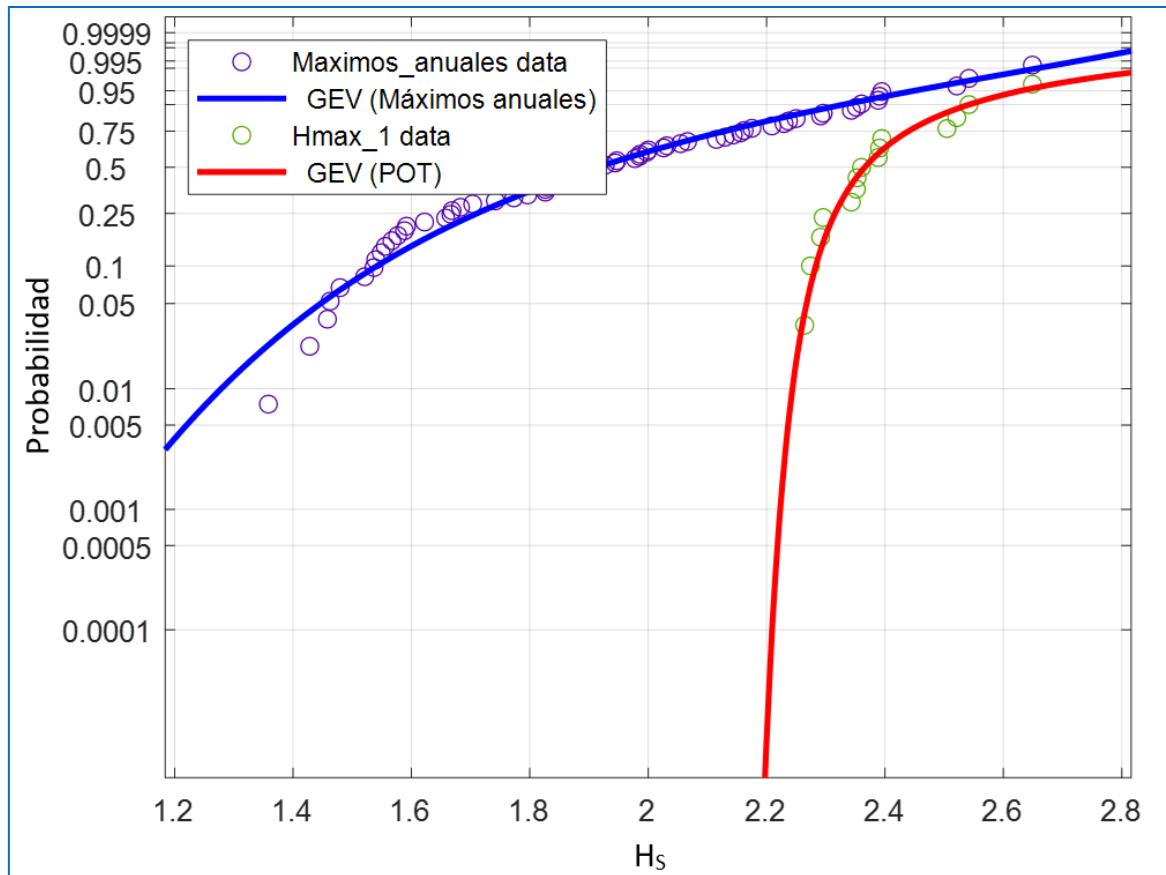


Figura 16. POT vs Máximos Anuales

Así pues, los parámetros resultantes para la GEV, mostrada en la Figura 17, son:

- $k = 0,198583$
- $\sigma = 0,07185$
- $\mu = 2,3383$

Con lo que la función que rige la probabilidad de que se supere el valor de altura de ola significativa resulta:

$$P'(H_s < H) = \exp \left\{ - \left[1 - k \left(\frac{H_s - \beta}{\alpha} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \right\} \quad (12)$$

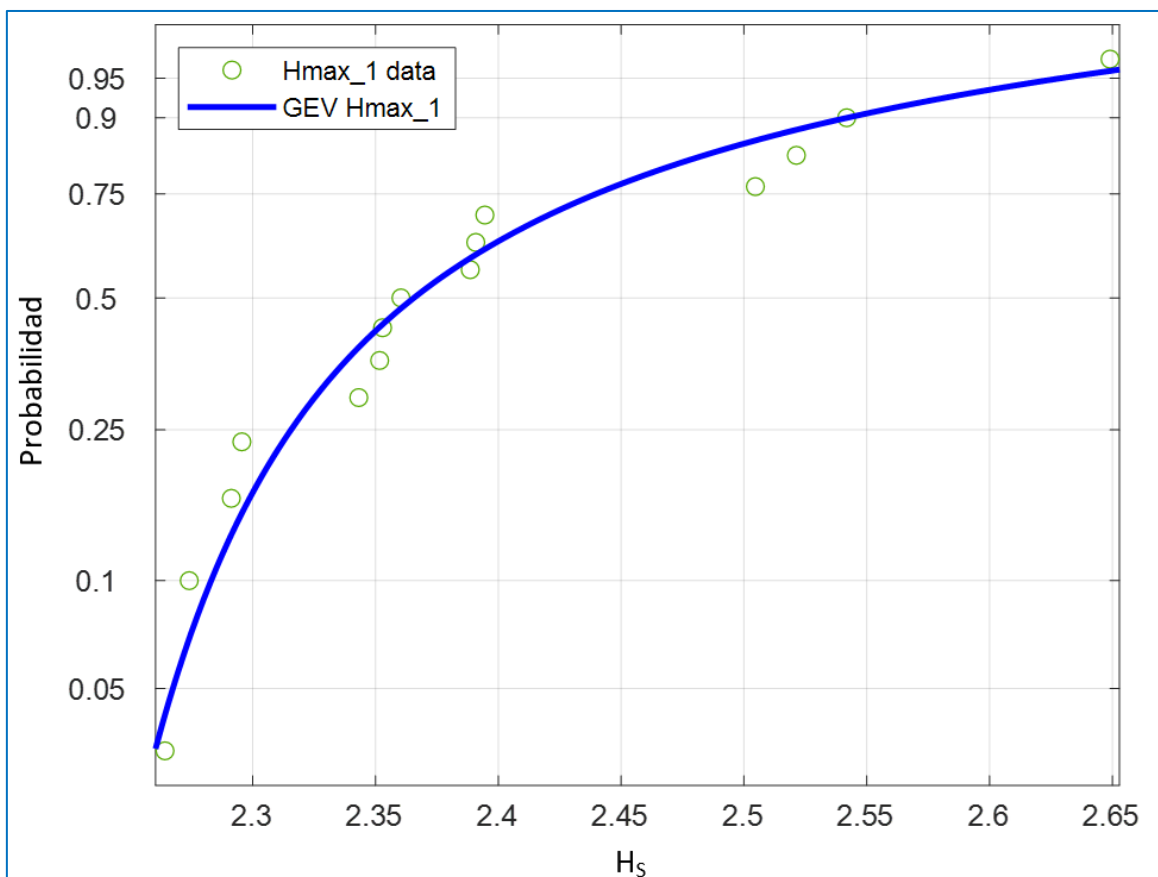


Figura 17. Ajuste del régimen extremal a una función GEV para un umbral de 2.25m.

Y, por lo tanto, la altura de ola significativa será:

$$H_s = \beta + \frac{\alpha}{k} \{1 - [-\log(P'(H_s < H))]^k\} \quad (13)$$

Para fijar la probabilidad de superación de la altura de ola significativa, se ha de tener en cuenta que la vida útil es de 25 años y la probabilidad de fallo durante este periodo del 10%, tal y como se ha obtenido de la ROM 0.0-0.1 [1]. Además, debido a que el método al que se ha recurrido es el POT y no el de máximos anuales ha de tenerse en cuenta el número medio de temporales por año (λ), definiendo las tormentas a partir del primer umbral de 1m de altura de ola. En este caso, atendiendo a los datos históricos del punto DOW, el número medio de temporales anuales resulta de $\lambda = 24,9$.

De esta forma, la probabilidad anual de no excedencia $P(H_s \leq H_{si})$ de un valor, se obtiene a partir de la función que ajusta la muestra extremal, denominada $P'(H_s \leq H_{si})$:

$$P(H_s \leq H_{si}) = 1 - \lambda[1 - P'(H_s \leq H_{si})] \quad (14)$$

Siendo entonces el periodo de retorno:

$$Tr = \frac{1}{1 - P(H_s \leq H_{si})} \quad (15)$$

El periodo de retorno resulta **$T_r = 237,8$ años**, la probabilidad de excedencia en un año **$P(H_s \leq H_{si}) = 0.9958$** y la probabilidad de superación de altura de ola significativa de la función ajustada mediante el análisis POT es de **$P'(H_s \leq H_{si}) = 0.9998$** y por ende, con el ajuste realizado a la función GEV, la altura de ola significativa es de **$H_s = 3.05m$** .

Para esta altura de ola significativa, la ROM 0.3-91 [2] propone valores de periodo pico entre los 8,5 y los 11 segundos, sin embargo, los datos históricos muestran valores superiores con lo que se realizó un ajuste a una curva potencial (Figura 18), cuyo resultado ha sido:

$$T_p(H_s) = 6,675\sqrt{H_s} \quad (16)$$

Por lo que el periodo pico más probable para la altura de ola significativa calculada será de 11,7 s. No obstante, se estudiará el rango entre los **13,0s y los 10,4s** para cubrir la dispersión de los datos históricos.

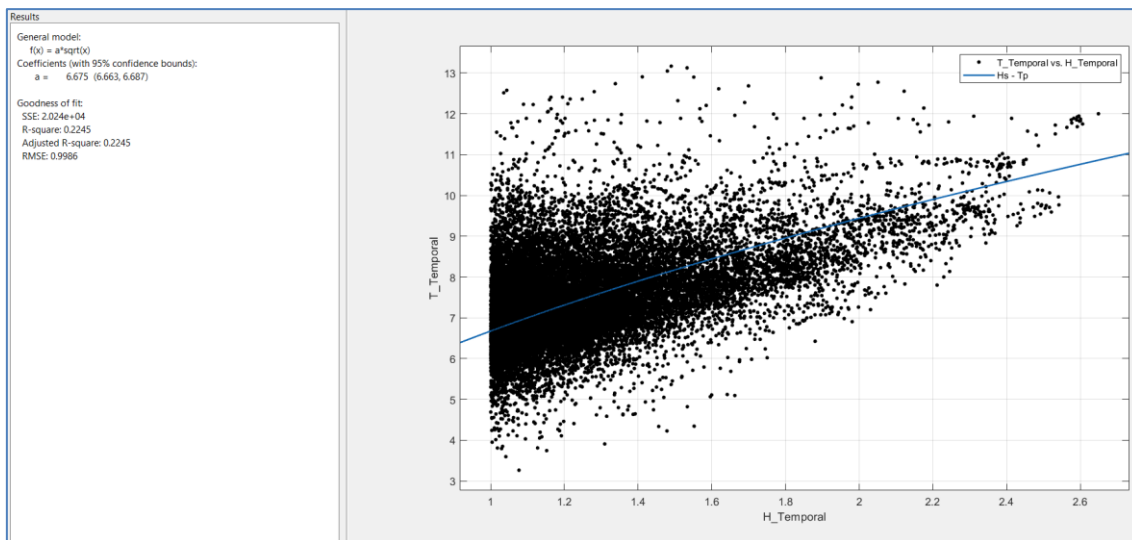


Figura 18. Ajuste de la curva H_s-T_p , realizado con Curve Fitting Tool en Matlab.

Por otra parte, la longitud de onda se obtiene de la ecuación de dispersión:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \rightarrow \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g \frac{2\pi}{L} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}h\right) \rightarrow L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}h\right) \quad (17)$$

Que, en profundidades indefinidas, donde el argumento de la tangente hiperbólica tiende a infinito y por lo tanto la función tiende a la unidad, haciendo pues que la longitud de onda sea independiente de la profundidad:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}h\right) \cong \frac{gT^2}{2\pi} \quad (18)$$

Esto supone una profundidad en profundidades indefinidas de **$L_0 = 213,7m$** y para la profundidad de 15m a la que se encuentra el pie de dique, de **$L = 131,4m$** .

Con respecto al nivel medio del mar en Alicante, este es el considerado por el Instituto Geográfico Nacional como el cero geodésico de altitudes en la Península Ibérica, la razón

es su pequeña variabilidad tal y como se observa en la Figura 19, la cual se trata de un gráfico de los niveles del mar horarios, obtenidos de los datos un punto GOT muy cercano a la zona de estudio. Se puede ver como la variabilidad es de unos pocos centímetros, siendo el máximo y el mínimo históricos de +0,11m y -0,11m respectivamente.

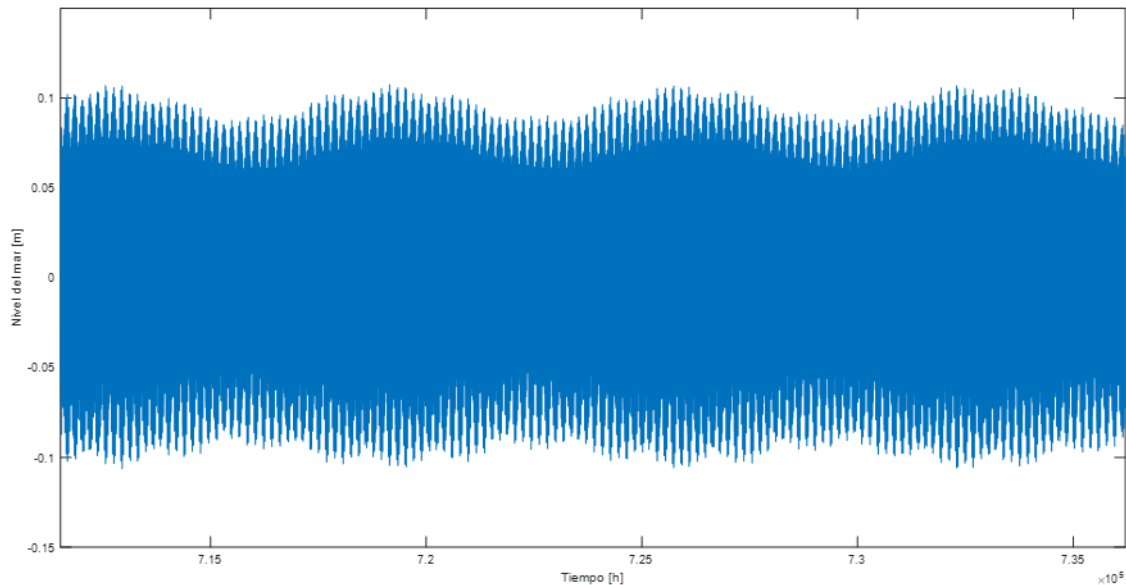


Figura 19. Niveles del mar horarios debidos a las mareas astronómicas del punto GOT.

Además, de la información del punto GOS sobre las mareas meteorológicas (Figura 20), se obtiene que el máximo histórico registrado es de +0,62m y el mínimo -0,44m. Existiendo muy pocos eventos de mareas meteorológicas superiores a +0,40m

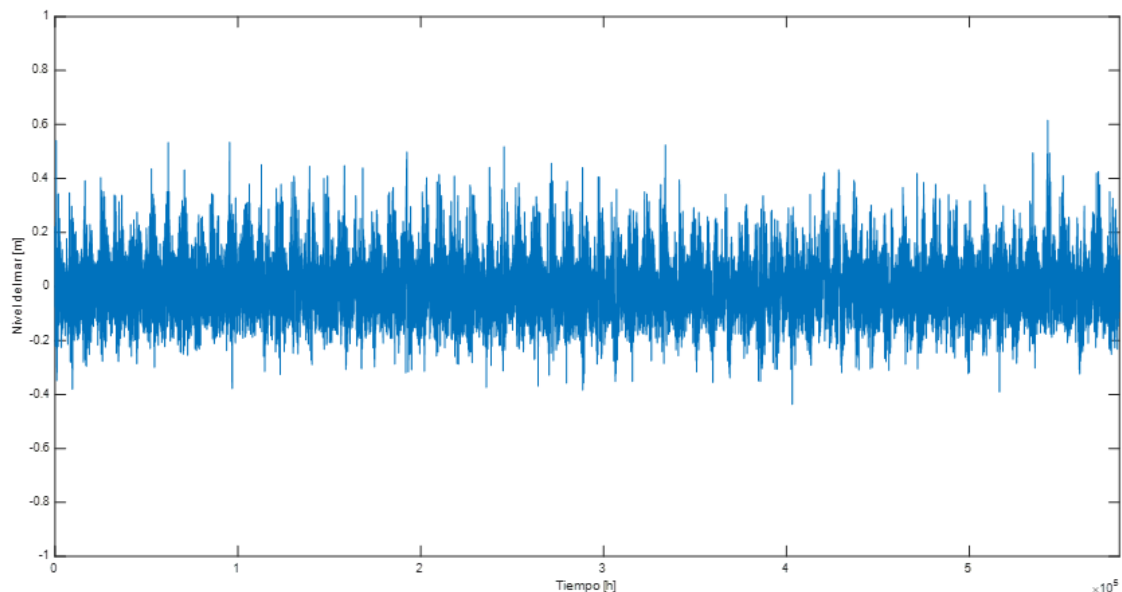


Figura 20. Niveles de mar horarios debidos a las mareas meteorológicas del punto GOS.

5. Diseño del dique vertical

Tal y como se ha comentado en el capítulo 3.3, la obra será diseñada con el método de verificación de nivel I, de coeficientes parciales.

En la Figura 21 se muestra un prediseño del dique vertical en el que se ha tenido en cuenta la geometría de la cámara (explicada en el capítulo 6) y para el cual se obtendrán a continuación las características geométricas necesarias para cumplir las condiciones de seguridad y funcionalidad deseadas.

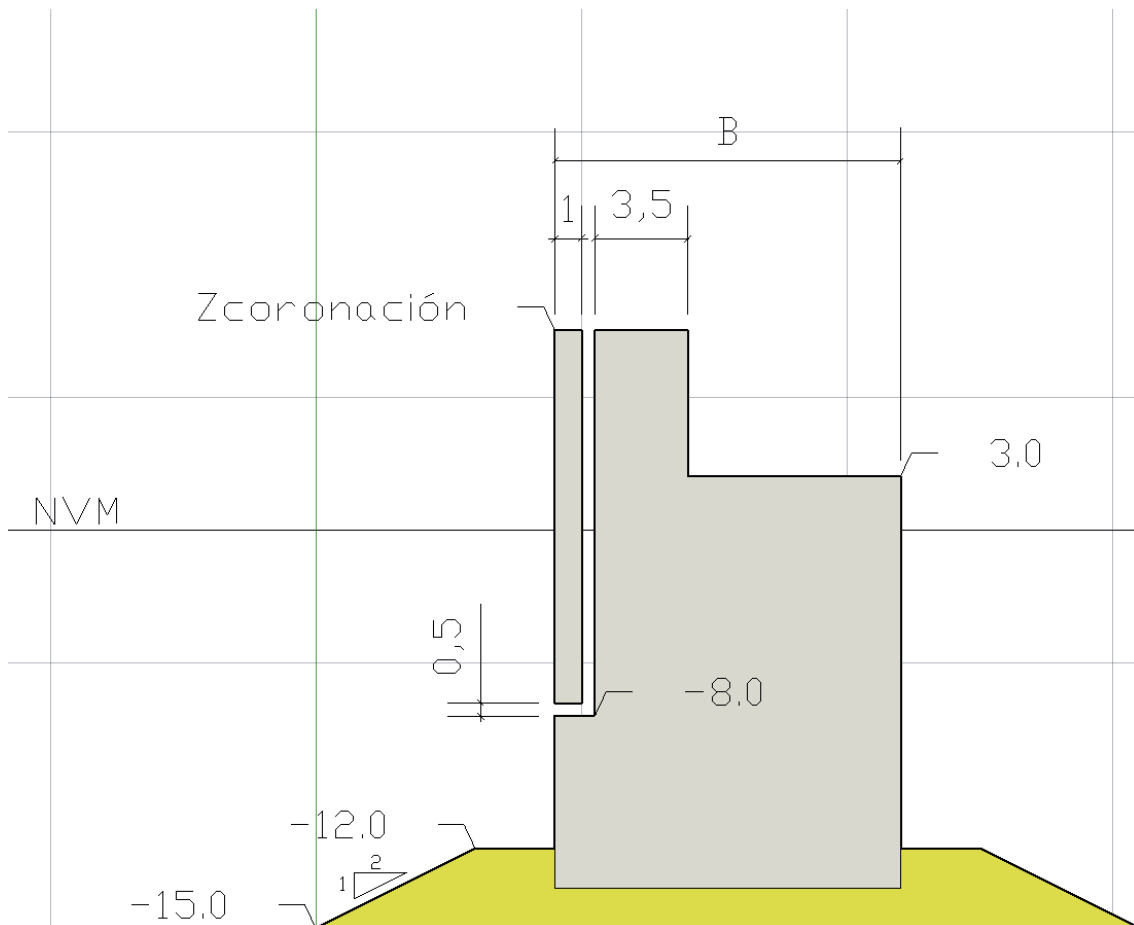


Figura 21. Geometría aproximada del dique.

5.1. Diseño funcional del dique vertical

El diseño del dique frente al rebase se realiza acorde con el EuroTop 2018 [12], que es un manual guía al usuario en la predicción del rebase sobre estructuras marítimas y el diseño de estas frente a la problemática asociada.

Este manual ofrece valores de caudales y volúmenes de rebase admisibles para diferentes condiciones de seguridad en el dique. Utilizando el criterio mostrado en la Figura 22 se determina que el caudal medio para asegurar la protección de las personas que pudieran estar sobre el dique no ha de sobrepasar los 0,3 L/s/m.

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume $V_{\max}$ (l per m)
People at structures with possible violent overtopping, mostly vertical structures	No access for any predicted overtopping	No access for any predicted overtopping
People at seawall / dike crest. Clear view of the sea.		
$H_{m0} = 3$ m	0.3	600
$H_{m0} = 2$ m	1	600
$H_{m0} = 1$ m	10-20	600
$H_{m0} < 0.5$ m	No limit	No limit
Cars on seawall / dike crest, or railway close behind crest		
$H_{m0} = 3$ m	<5	2000
$H_{m0} = 2$ m	10-20	2000
$H_{m0} = 1$ m	<75	2000
Highways and roads, fast traffic	Close before debris in spray becomes dangerous	Close before debris in spray becomes dangerous

Figura 22. Valores de caudal medio y volumen máximo de rebase admisibles, según EuroTop (2018) [12].

El EuroTop proporciona una formulación general, basada en el trabajo de Owen (1980), de la cual derivan varias formulaciones distintas que se ajustan a casos concretos, tal y como se muestra en la Figura 23 que propone el uso del método en que este documento es la ecuación (21).

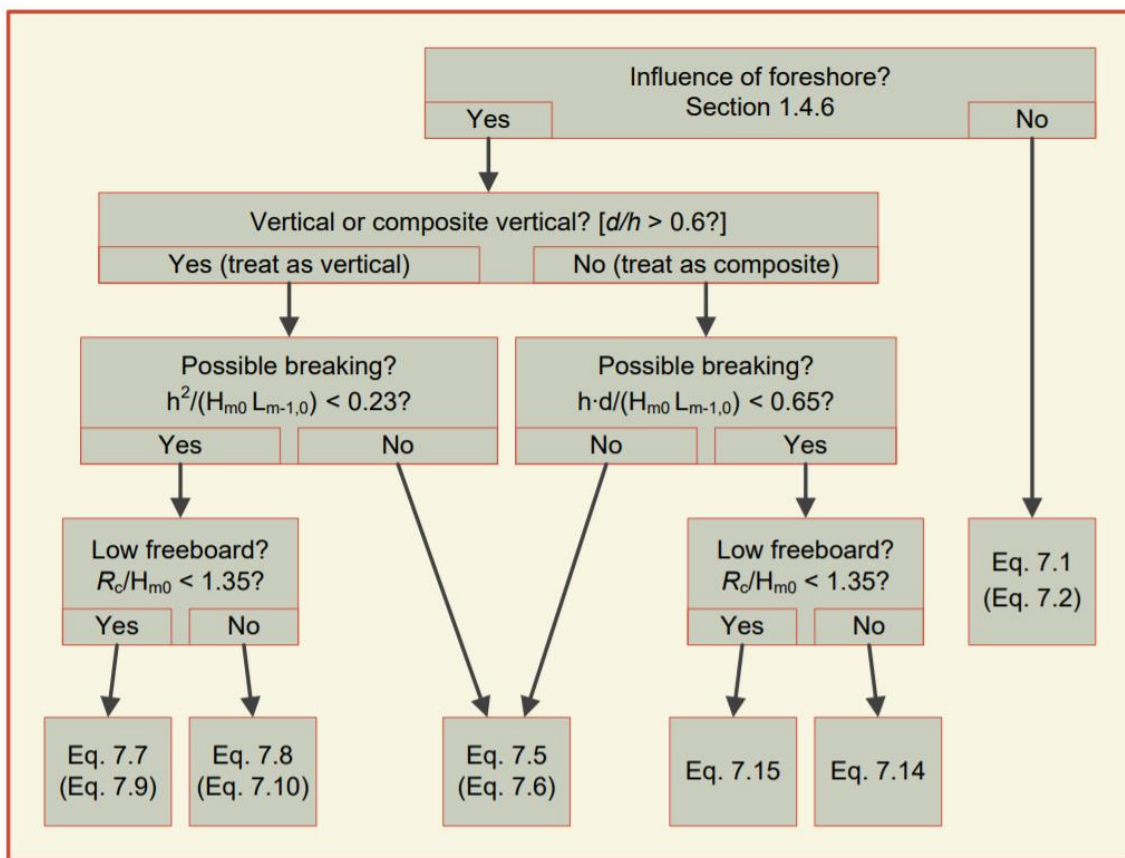


Figura 23. Diagrama para la determinación de la formulación de cálculo de rebase, según EuroTop (2018) [12].

$$\frac{q}{\sqrt{9 H_{m0}^3}} = a \exp\left(-b \frac{R_c}{H_{m0}}\right) \quad (19)$$

Donde:

- q es el caudal de rebase.
- G es la aceleración de la gravedad.
- H_{m0} es la altura de momento de orden 0, que se asemeja a la altura de ola significativa.
- R_c es el francobordo del dique.
- a y b son coeficientes utilizados para el ajuste de la formulación.

Siguiendo pues la metodología propuesta en la Figura 23, para conocer la formulación a aplicar, se determina la relación H_{m0}/h en profundidades indefinidas, que en este caso resulta de 4,92. La EuroTop se basa en el criterio propuesto por Hofland *et al.* (2017) para la definición de la influencia del fondo sobre el oleaje, que es el siguiente:

- $H_{m0}/h > 4$, aguas profundas.
- $4 > H_{m0}/h > 1$, aguas someras.
- $1 > H_{m0}/h > 0,3$, aguas muy someras.
- $0,3 > H_{m0}/h$, aguas extremadamente someras.

Así pues, para el caso de estudio en el cual no existe una influencia del lecho marino sobre el oleaje, la formulación aplicable es la siguiente:

$$\frac{q}{\sqrt{9 H_{m0}^3}} = 0.054 \exp\left[-\left(2.12 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{1.3}\right] \quad (20)$$

De la cual se deduce que, para que se cumpla la condición de que el caudal de rebase sea menor de 0,3 L/s/m, para una altura $H_{m0} = 3,05\text{m}$, el francobordo ha de ser como mínimo $R_c = 7,12\text{m}$ para el nivel del mar máximo, considerando las mareas astronómicas y meteorológicas. Teniendo en cuenta la pequeña variabilidad del nivel del mar en la zona de implantación vista en el capítulo 4.2, la cota de coronación se ha fijado tomando el valor constructivo de $Z_{\text{coronación}} = 7,5\text{m}$.

5.2. Diseño último del dique vertical

La ROM 1.0-09 [3] define el concepto de modo de fallo como el mecanismo, generalmente caracterizado por un estado límite, por el cual se puede producir el fallo de la estructura. En el caso de la tipología de dique vertical, diferenciando entre la zona de la estructura en la cual se desencadena el fallo, la ROM muestra un esquema de los diferentes ELU (Estados Límite Últimos) representado en la Figura 24.

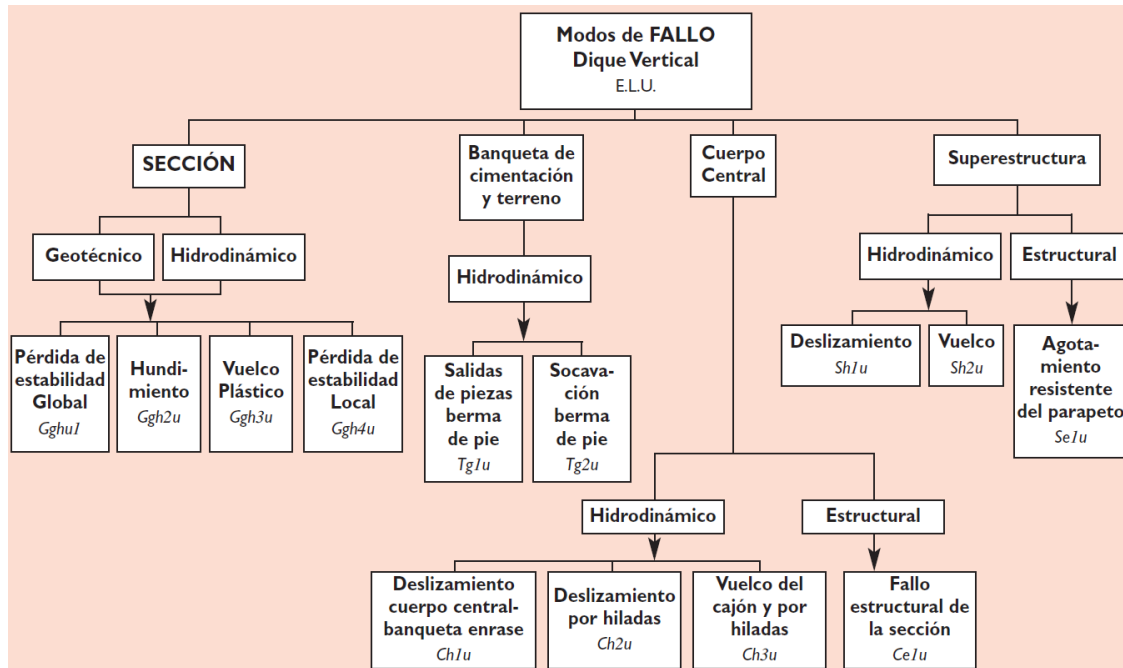


Figura 24. Organigrama de modos de fallo facilitado por la ROM 1.0-09 [3].

Para el dimensionamiento del dique se han realizado los cálculos frente a los modos de fallo del cuerpo central debidos a la hidrodinámica, de vuelco y de deslizamiento del cajón, así como de la integridad de la berma de protección del dique.

5.2.1. Berma de protección del pie del dique

La berma de protección del dique ha sido diseñada mediante la metodología propuesta por Tanimoto (1982) [8], que realizó varios ensayos experimentales para estudiar la afección de oleajes irregulares sobre las piezas de la escollera de la banquetta de cimentación de diques mixtos, para un caso bidimensional de incidencia de oleaje normal al paramento. Dado que la formulación de Tanimoto [8] ha sido ideada para oleaje irregular, se puede asumir que la altura máxima de ola que se debe utilizar será el doble de la altura de ola significativa.

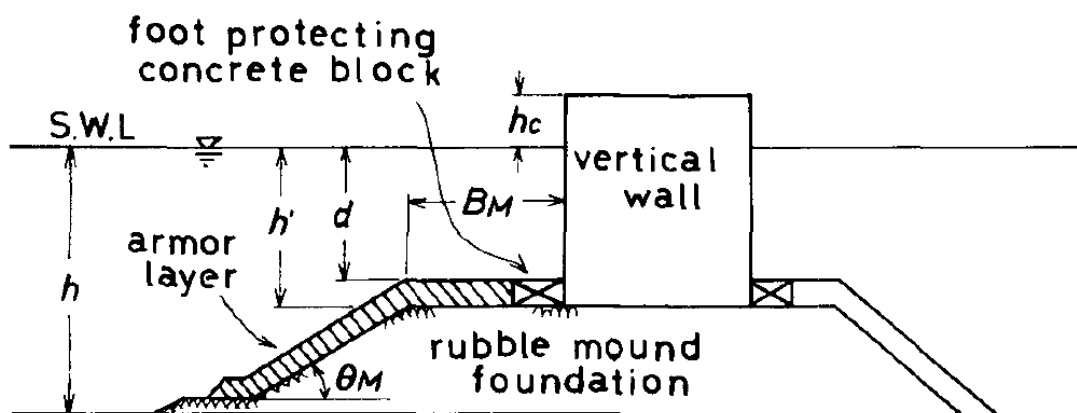


Figura 25. Esquema de las variables aplicadas en la formulación de Tanimoto (1982). Obtenido en: Tanimoto (1982) [8].

La formulación propuesta por Tanimoto [8] está basada en campo de velocidades de flujo causado por la onda estacionaria que se genera frente al paramento del dique vertical. Junto al paramento del dique se sitúa el antinodo y por tanto las velocidades horizontales son mínimas, ocurriendo lo opuesto a una distancia $L'/4$ del dique, donde se habrá generado un nodo y por ende serán máximas las velocidades horizontales. Esto queda patente al sustituir el valor de B_m por los citados valores en la ecuación (23).

Así pues, los esfuerzos sobre la banquetta serán mayores cuanto menor sea su profundidad y cuanto mayor sea la longitud de onda, como se puede observar en la ecuación (23), habiéndose de comprobar si estos son superiores para los periodos máximos o mínimos.

Esta formulación determina el peso de las piezas de la banquetta (W) de la siguiente forma:

$$W = \frac{\gamma_w S_r}{(S_r - 1)^3} \psi H_I^3 ; H_I = H_{max} = 2 H_s \quad (21)$$

Donde:

- γ_w es el peso específico del agua.
- S_r es la relación γ_s / γ_w . Siendo γ_s el peso específico del material del que se compone la berma.
- H_I es la altura incidente, anteriormente mencionada.
- Ψ es la función de estabilidad, que para el caso de un manto de escollera cuyo espesor sea de dos o más piezas e incidencia del oleaje normal al paramento, resulta:

$$\psi = MIN \left\{ 0,03; \left[4,2 \frac{1-c}{c^{1/3}} \frac{h'}{H_I} + 3,24 \exp \left(-2,7 \frac{(1-c)^2}{c^{1/3}} \frac{h'}{H_I} \right) \right]^{-3} \right\} \quad (22)$$

$$c = \frac{\frac{4\pi h'}{L'}}{\sinh \left(\frac{4\pi h'}{L'} \right)} \sin^2 \left(\frac{2\pi B_m}{L'} \right) \quad (23)$$

Siendo:

- c , es el coeficiente que considera la acción conjunta de la profundidad y distancia relativas, cuyo valor se obtiene de la expresión (62).
- h' , la profundidad de la banquetta.
- L' , la longitud de onda para el periodo de cálculo y a la profundidad h' .
- B_m , es el ancho de la berma de la banquetta.

Esta formulación no es válida para el cálculo de la banquetta en la zona del morro del dique.

Así pues, para el caso de estudio, dada la reducida altura de ola incidente las piezas resultantes de esta formulación son de un peso muy reducido ya que esta se encuentra elevada al cubo tal y como se muestra en la Ecuación (22). Suponiendo una banquetta de 1,5m de altura y de ancho de berma de 3 a 8 metros como resulta habitual en la zona de estudio, las piezas habrían de tener un peso mínimo de entre 28,7 y 270,8 N, es decir



de entre 2,9 y 27,6 kg, los cuales son valores de pequeña magnitud que reflejan la poca afección a la berma.

5.2.2. Estabilidad del dique

Al diseñar un dique vertical se ha de tener en cuenta si el oleaje puede llegar a la estructura en proceso de rotura, ya que esto puede generar sobre el paramento cargas impulsivas que provocan grandes presiones sobre el paramento.

Para conocer si el oleaje puede sufrir una rotura sobre la estructura causada por el talud de fondo se puede utilizar la siguiente relación entre la altura de ola (H , medida a aproximadamente tres veces la longitud de onda) y la profundidad a pie de dique (h_2):

$$\frac{H}{h_2} \geq 0.4 \quad (24)$$

También puede producirse la rotura en la banqueta de apoyo en el caso de que se cumplan alguna de las siguientes condiciones:

$$\frac{h_1}{h_2} < 0.45 \quad (25)$$

Siendo h_1 la profundidad de la banqueta. Si se cumple esta condición, la rotura se puede ocasionar para cualquier ancho de la banqueta, mientras que si esta relación se encuentre en el siguiente rango:

$$0.45 < \frac{h_1}{h_2} < 0.75 \quad (26)$$

La rotura de la ola sólo se producirá para ciertos valores de la anchura de la banqueta y profundidad relativa.

Para la altura de ola significativa considerada, la altura máxima de ola utilizada para el cálculo de estabilidad será:

$$H = H_{max} = 1.8 H_s \quad (27)$$

En aquellos casos en los que no se produce la rotura del oleaje, se opta generalmente por la formulación de Goda (1985) [9], cuyo uso está muy extendido actualmente y que arroja resultados ampliamente contrastados. En el caso de que se confirme una rotura de la ola por fondo (Ecuación (24)) o por interacción con la banqueta (Ecuaciones (25) o (26)), la formulación a utilizar es el método de Takahashi *et al.* (1994) [13], que consiste en una modificación del método desarrollado por Goda para la estimación precisa de las fuerzas de impacto sobre el dique.

Método de Goda (1985)

Para determinar los esfuerzos inducidos por el oleaje en el dique, teniendo en cuenta lo anteriormente explicado, se ha recurrido a la formulación propuesta por Goda (1985) [9]. Esta formulación considera una distribución de presiones trapezoidal en el paramento del dique situado a barlomar y triangular para las subpresiones.

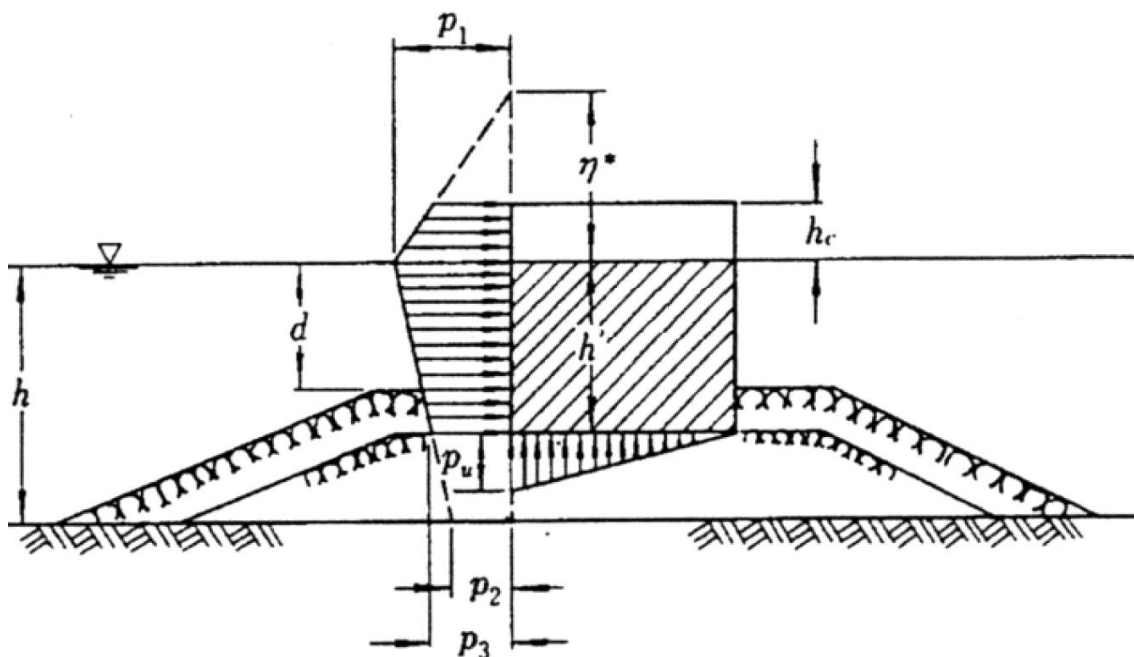


Figura 26. Variables geométricas y presiones consideradas en la formulación de Goda (1985) [9].

La máxima cota alcanzada por la ola se calcula con la expresión (28) para el run-up máximo, siguiendo la recomendación de Goda de considerar un ángulo de incidencia 15° inferior al esperado para mayorar las cargas. En este caso se ha considerado una incidencia normal, con lo que el ángulo es nulo.

$$\eta^* = 0,75[1 + \cos(\beta)]H_I \quad (28)$$

Donde:

- β es el ángulo de incidencia del oleaje, medido desde la perpendicular al paramento del dique.
- H_I es la altura de ola incidente, que en esta formulación se corresponden con una altura $H_{1/250}$, o de 1,8 veces la altura de ola significativa.

Por otra parte, las supresiones se calculan según las ecuaciones (29).

$$p_1 = \frac{1}{2}[1 + \cos(\beta)] [\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2(\beta)] \rho g H_I$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \quad (29)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

Y los coeficientes α_i :

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0,6 + \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{L}\right)} \right]^2 \\ \alpha_2 &= \text{MIN} \left\{ \frac{(h_b - d)}{3h_b} \left(\frac{H_l}{d} \right)^2 ; \frac{2d}{H_l} \right\} \\ \alpha_3 &= 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{2}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \right]\end{aligned}\quad (30)$$

Siendo:

- h , el calado de cálculo.
- h' , la profundidad de cimentación del cajón.
- h_b , la profundidad a una distancia de 5 veces la altura de la significante.
- d , la profundidad de la berma de protección.

El coeficiente α_1 hace referencia al incremento de la presión ejercida por el oleaje al aumentar el periodo de este, con lo que será mínimo en profundidades indefinidas y máximo en profundidades reducidas, tomando valores comprendidos entre 0,6 y 1,1. El coeficiente α_2 representa el incremento de la presión ejercida por el oleaje a raíz de la presencia del talud de la cimentación del dique. El coeficiente α_3 considera una distribución lineal de presiones.

Finalmente, la distribución de la subpresión se ha determinado considerando una distribución lineal que varía entre un valor (p_u) en el pie del dique ubicado a barlomar y que se hace nula a sotamar. El valor de la presión p_u será menor que la presión p_3 puesto que multitud de comprobaciones en casos reales han concluido que igualar este valor de la subpresión al de la presión horizontal, supone una considerable sobreestimación de los esfuerzos de flotación. Así pues, la subpresión se calcula como:

$$p_u = \frac{1}{2} [1 + \cos(\beta)] \alpha_1 \alpha_3 \rho g H_l \quad (31)$$

Método de Takahashi (1994)

Basado en una serie de ensayos de laboratorio, en el método de Takahashi *et al.* (1994) [13] se modifica el parámetro α_2 que se redefine como:

$$\alpha_2 = \text{MAX} \{ \alpha_{2, \text{Godá}}, \alpha_i \} \quad (32)$$

Siendo $\alpha_{2, \text{Godá}}$ el anteriormente mostrado en la Ecuación (30) y α_i el obtenido de la siguiente forma:

$$\alpha_i = \alpha_{i0} \alpha_{i1} \quad (33)$$

Siendo α_{i0} :

$$\alpha_{i0} = \begin{cases} \frac{H_i}{d}, & \text{si } H_i \leq 2d \\ 2, & \text{si } H_i > 2d \end{cases} \quad (34)$$

Y pudiéndose obtener α_{i1} de forma gráfica mediante el ábaco (Figura 1) o mediante la formulación mostrada a continuación:

$$\alpha_{i1} = \begin{cases} \frac{\cos(\delta_2)}{\cosh(\delta_1)}, & \text{si } \delta_2 \leq 0 \\ \frac{1}{\cosh(\delta_1) \cosh(\delta_2)}, & \text{si } \delta_2 > 0 \end{cases} \quad (35)$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 20 \delta_{11}, & \text{si } \delta_{11} \leq 0 \\ 15 \delta_{11}, & \text{si } \delta_{11} > 0 \end{cases} \quad (36)$$

$$\delta_{11} = 0.93 \left(\frac{B_m}{L} - 0.12 \right) + 0.36 \left(\frac{h_s - d}{h_s} - 0.6 \right) \quad (37)$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 4.9 \delta_{22}, & \text{si } \delta_{22} \leq 0 \\ 3 \delta_{22}, & \text{si } \delta_{22} > 0 \end{cases} \quad (38)$$

$$\delta_{11} = -0.36 \left(\frac{B_m}{L} - 0.12 \right) + 0.93 \left(\frac{h_s - d}{h_s} - 0.6 \right) \quad (39)$$

Para la utilización del método gráfico, mostrado en la Figura 27, se han de conocer los valores B_m/L y $(h-d)/h$ o d/h en su defecto, para de esta forma conocer el punto por el cual pasa la curva α_{i1} .

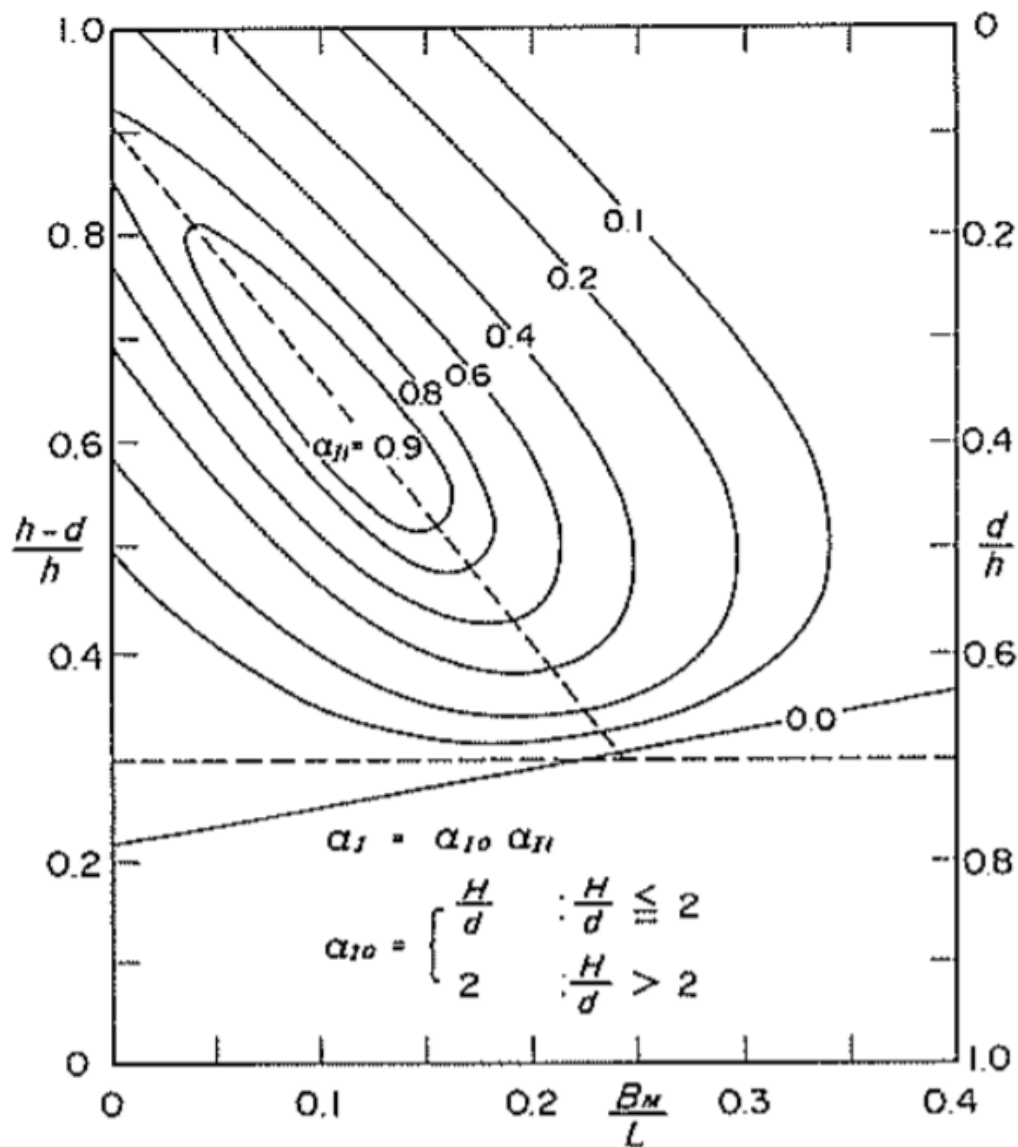


Figura 27. Ábaco para la obtención del parámetro α_{11} Takahashi et al.1994 [13].

Geometría y los coeficientes de seguridad

Teniendo en cuenta que la altura de ola significativa, determinada en el apartado 4.2, es de 3,05m y que por lo tanto $H_I = H_{\max} = 5.49$, utilizando el criterio de la Ecuación (24) no se espera una rotura del oleaje. Con lo que se ha utilizado la formulación de Goda para el cálculo de los esfuerzos sobre el dique vertical, que ha arrojado los resultados mostrados en la Tabla 12. El nivel de mar de cálculo se ha establecido en la cota +0,4m.

Tabla 12. Resultados obtenidos de la formulación de Goda (1985).

Variable	Valor	Unidades
H_I	5,49	m
L	149,44	m
β	0,00	rad
d	13,4	m
h	15,4	m
h'	13,90	m
h_b	15,4	m
η^*	8,23	m
α_1	0,8941	-
α_2	0,0073	-
α_3	0,8390	-
p_1	49,73	kN/m ²
p_2	41,25	kN/m ²
p_3	41,72	kN/m ²
p_u	41,39	kN/m ²

Una vez conocidas todas las leyes de presiones actuantes soben el cajón, se han determinado las fuerzas en dirección horizontal (F_H) y vertical (F_S) y con ellas los momentos desestabilizadores generados por la presión horizontal (M_H) y por la subpresión (M_S). Estos esfuerzos tendrán de ser compensados hasta alcanzar el nivel de seguridad deseado.

$$\begin{aligned}
 F_H &= \frac{1}{2}(p(z = h_c) + p_1) \frac{Z_{\text{coronación}} - HAT}{2} + \frac{1}{2}(p_1 + p_3)(h_{\text{paramento}} + HAT) \\
 F_S &= \frac{1}{2}p_u(B + 2 \text{ Salientes}) \\
 M_H &= F_H Z_{F_H} \\
 M_S &= F_S X_{F_S}(B) = F_S \frac{2}{3}B
 \end{aligned} \tag{40}$$

Mientras que el rozamiento y el momento estabilizador provocado por el peso propio de la estructura, para el cual se ha considerado el hueco de la cámara de oscilación, resulta:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{Rozamiento}} &= P(B) \mu \\
 M_{\text{est}} &= P(B) X_{\text{Estructura}}(B)
 \end{aligned} \tag{41}$$

Y los coeficientes de seguridad frente al vuelco (C_{SV}) y al deslizamiento (C_{SD}), considerando un coeficiente de rozamiento entre el cajón y la cimentación (μ) de 0,5 que es un valor aproximado que se corresponde con lo recomendado por la ROM 1.0-09 [3] para una cimentación sobre grava, son pues:

$$\begin{aligned}
 C_{SD} &= \frac{\mu(P - F_V)}{F_H} \\
 C_{SV} &= \frac{M_{\text{est}}}{M_{\text{desest}}}
 \end{aligned} \tag{42}$$

Se busca obtener unos coeficientes de seguridad de entre 1,4 y 1,5 con lo que el ancho de dique tomado ha sido **B = 13,0m**, resultando un coeficiente de seguridad al vuelco de 1,5 y al deslizamiento de 2,6.

Tabla 13. Esfuerzos y coeficientes de seguridad obtenidos.

Variable	Valor	Unidades
F_H	964,5	kN
F_V	269,0	kN
M_H	17369,0	kNm
M_S	2331,7	kNm
P	5602,5	kN
M_{Est}	28529,4	kNm
C_{SD}	2,65	-
C_{SV}	1,53	-

6. Diseño del dispositivo OWC

Para la extracción de una mayor cantidad de energía, el diseño del dispositivo ha de ser optimizado para el periodo de oleaje más energético, dimensionando la geometría de la columna de agua de forma que genere una resonancia con el oleaje incidente. Se explica a continuación el proceso seguido para determinar el periodo óptimo de diseño y los requisitos para que la estructura entre en resonancia.

6.1. Potencial energético del oleaje

La energía total de un tren de onda es la suma de su energía potencial y cinética que, siguiendo la teoría lineal, se puede definir por unidad de superficie del tren de ondas a partir de la siguiente forma:

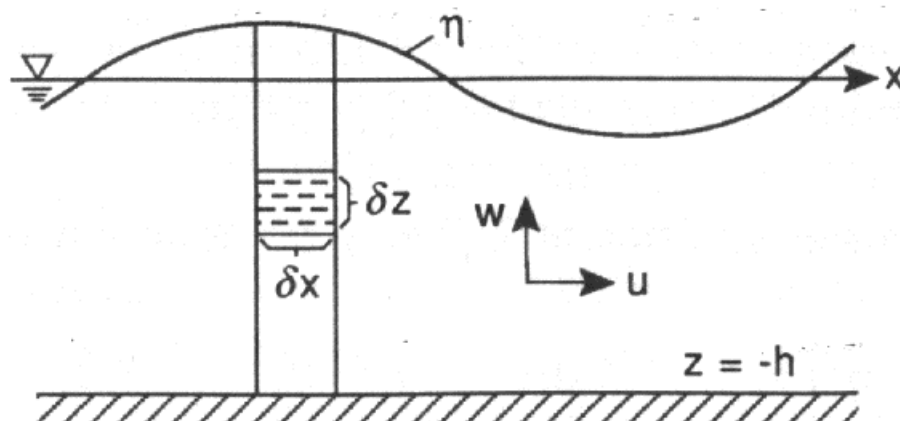


Figura 28. Esquema de la columna de agua para la obtención de la energía.

La energía cinética del frente de onda, que avanza en la dirección X, es:



$$E_c = m \frac{v^2}{2} = \rho V \frac{v^2}{2} \rightarrow dE_c = \rho dV \frac{v^2}{2} = \rho dx dy dz \frac{(\sqrt{u^2 + w^2})^2}{2} \quad (43)$$

$$= \rho dx dy dz \frac{(u^2 + w^2)}{2}$$

Siendo u y w las velocidades de partícula en el eje X y el eje Z respectivamente. Calculando entonces por unidad de ancho del frente de onda (eje Y):

$$E_c = \rho dx dz \frac{u^2 + w^2}{2} \quad (44)$$

La energía cinética media se obtiene pues integrando en la longitud de onda y en la columna de agua, que aplicando la teoría lineal a una onda progresiva:

$$\overline{E_c} = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{(u^2 + w^2)}{2} dx dz \quad (45)$$

Donde:

$$u = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) = \frac{H g k}{2 \omega} \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (46)$$

$$w = \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) = \frac{H g k}{2 \omega} \frac{\sinh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t)$$

Siendo:

- k, el número de onda que se relaciona con la longitud de onda de la siguiente forma: $2\pi/L$.
- h, la profundidad del agua.
- ω , la frecuencia angular que se relaciona con el periodo de onda de la siguiente forma: $2\pi/T$.

Con lo que, por unidad de superficie (A):

$$= \frac{1}{2L} \left(\frac{g A k}{\omega} \frac{1}{\cosh(kh)} \right)^2 \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \left((\cosh^2(k(h+z)) \cos^2(kx - \omega t)) \right. \quad (47)$$

$$\left. + (\sinh^2(k(h+z)) \sin^2(kx - \omega t)) \right) dx dz$$

La energía cinética por unidad de superficie resulta:

$$E_c = \frac{1}{4} \rho g A^2 = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (48)$$

Por otra parte, la energía potencial que genera el peso de la columna de agua al elevarse sobre su posición de equilibrio:



$$dm = \rho(h + \eta)dx \rightarrow dE_p = dm g \frac{h + \eta}{2} = \rho g \frac{(h + \eta)^2}{2} dx \quad (49)$$

Integrando en la longitud de onda:

$$\overline{E_p} = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} dV = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \rho g \frac{(h + \eta)^2}{2} dx = \rho g \frac{h^2}{2} + \rho g \frac{H^2}{16} \quad (50)$$

En esta última expresión, la primera componente se corresponde con la energía generada por el agua en reposo y el segundo a la generada por el propio oleaje, con lo que la energía potencial generada por unidad de superficie de ola es:

$$E_p = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (51)$$

Y sumando las dos componentes, cinética y potencial, se obtiene la energía total generada por unidad de superficie horizontal, que es independiente de la profundidad y el periodo, dependiendo tan solo de altura de ola:

$$E(H) = \frac{1}{16} \rho g H^2 + \frac{1}{16} \rho g H^2 = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (52)$$

La potencia se puede definir como el flujo medio de energía, siendo que esta se propaga a la velocidad de grupo (C_g), con lo que multiplicando por esta se obtiene la potencia por unidad de ancho de frente de ola:

$$P_{oleaje} = E C_g \quad (53)$$

Obteniéndose la velocidad de grupo a partir de la velocidad de onda C :

$$C_g = C \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) = \frac{L}{T} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (54)$$

6.2. Energía aprovechable por el sistema OWC

La energía que se puede obtener con el sistema OWC depende del caudal de aire que la oscilación de la superficie libre en la columna desplace, el cual es turbinado haciendo rotar el generador. Para una estimación de la energía generada se ha supuesto un rendimiento del sistema de extracción basado en la diversa bibliografía consultada, que se multiplicara por el potencial energético del flujo de aire.

Por el principio de conservación de la masa, se puede obtener el caudal de aire en función del desplazamiento de la lámina de agua en la columna:

$$Q_{aire} = Q_{agua} = A \frac{d\eta}{dt} = A v_{agua} = A v_{aire} \rightarrow v_{aire} = v_{agua} \quad (55)$$

Siendo v la velocidad del aire que fluye por la cámara y A el área transversal de esta. La energía cinética del flujo de aire ($E_{c, \text{neumática}}$) resulta entonces:

$$E_{c, \text{neumática}} = \frac{1}{2} m_{\text{aire}} v_{\text{aire}}^2 = \frac{1}{2} A \rho_{\text{aire}} v_{\text{aire}}^2 \quad (56)$$

La masa que genera esta energía cinética es aquella que atraviesa una sección de la cámara con lo que se puede obtener la energía generada por unidad de tiempo, es decir la potencia neumática, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P_{\text{neumática}} &= \frac{1}{2} \dot{m}_{\text{aire}} v_{\text{aire}}^2 = \frac{1}{2} Q_{\text{aire}} \rho_{\text{aire}} v_{\text{aire}}^2 = \frac{1}{2} A v_{\text{aire}} \rho_{\text{aire}} v_{\text{aire}}^2 \\ &= \frac{1}{2} A \rho_{\text{aire}} v_{\text{aire}}^3 \end{aligned} \quad (57)$$

El rendimiento del sistema PTO real varía con la amplitud y frecuencia de la oscilación del flujo en la cámara, pero dado el desconocimiento del comportamiento del sistema de extracción de energía, se ha optado por utilizar un rendimiento medio (R) para la estimación de la potencia extraída:

$$P_{\text{extraída}} = R \frac{1}{2} m w^2 = R \frac{1}{2} \rho_{\text{aire}} A w^3 \quad (58)$$

6.3. Periodo óptimo de diseño

El periodo óptimo de diseño de la cámara OWC es aquel para el cual se genera una mayor cantidad de energía a lo largo del tiempo y para el cual se optimizará la geometría de la cámara, de forma que su frecuencia natural de resonancia coincida con el periodo óptimo. Así pues, se busca el periodo para el cual el sumatorio de la energía de sus estados de mar ponderados con la probabilidad de ocurrencia de cada uno, sea máximo. Partiendo de los datos DOW horarios de altura significativa y periodo pico del oleaje recabados a lo largo de más de 67 años, se han dividido en rangos de altura significativa de ola y periodo pico y se ha realizado un conteo de los eventos registrados para cada rango de altura significativa y periodo pico, tal y como muestra la Figura 29.

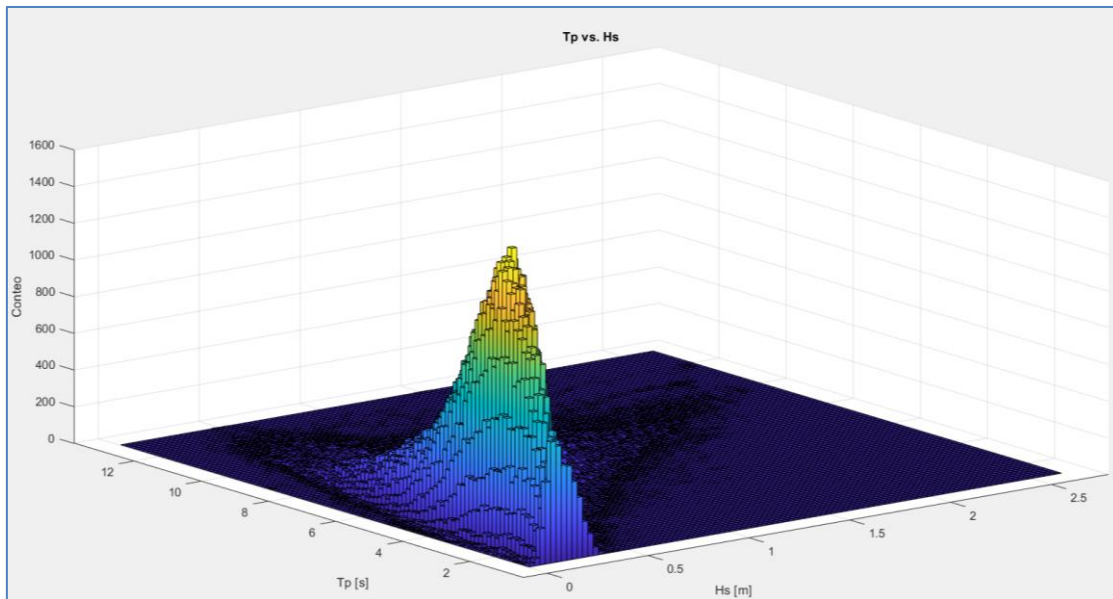


Figura 29. Conteo de los eventos registrados para cada rango de periodo pico y altura de oleaje.

Conocido el conteo y por tanto la probabilidad de ocurrencia de cada estado, se ha determinado la energía asociada a cada altura de ola según la Ecuación (52), obteniéndose el mapa de energías de oleaje asociadas a la altura de ola para cada franja de periodo pico, con su respectivo conteo de eventos, mostrado en la Figura 30.

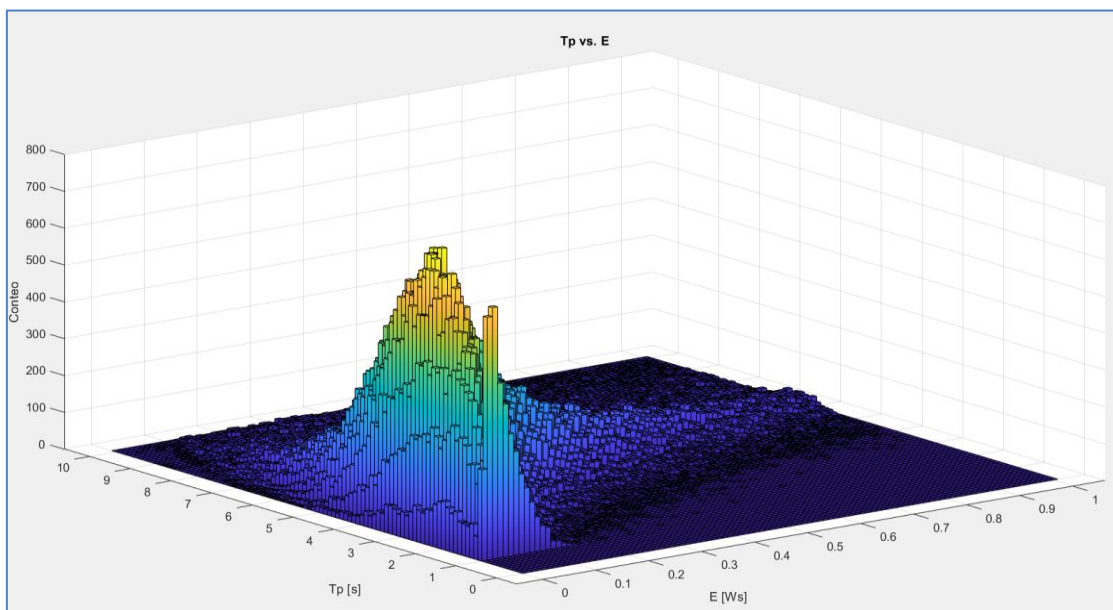


Figura 30. Conteo de los eventos registrados para cada rango de periodo pico y energía de oleaje.

Conocidos ahora los valores de la energía y la probabilidad de ocurrencia de cada punto de la malla, se ha obtenido el periodo óptimo de diseño como aquel cuya franja albergue una máxima suma total de energía, ponderando esta con la probabilidad de ocurrencia de cada evento, así pues, se ha obtenido un rango de periodos óptimo de 6,00 – 6,10s como se puede observar en la Figura 31, siendo el valor $T_{\text{óptimo}} = 6,05s$ el valor medio de este rango que se ha tomado como el representativo.

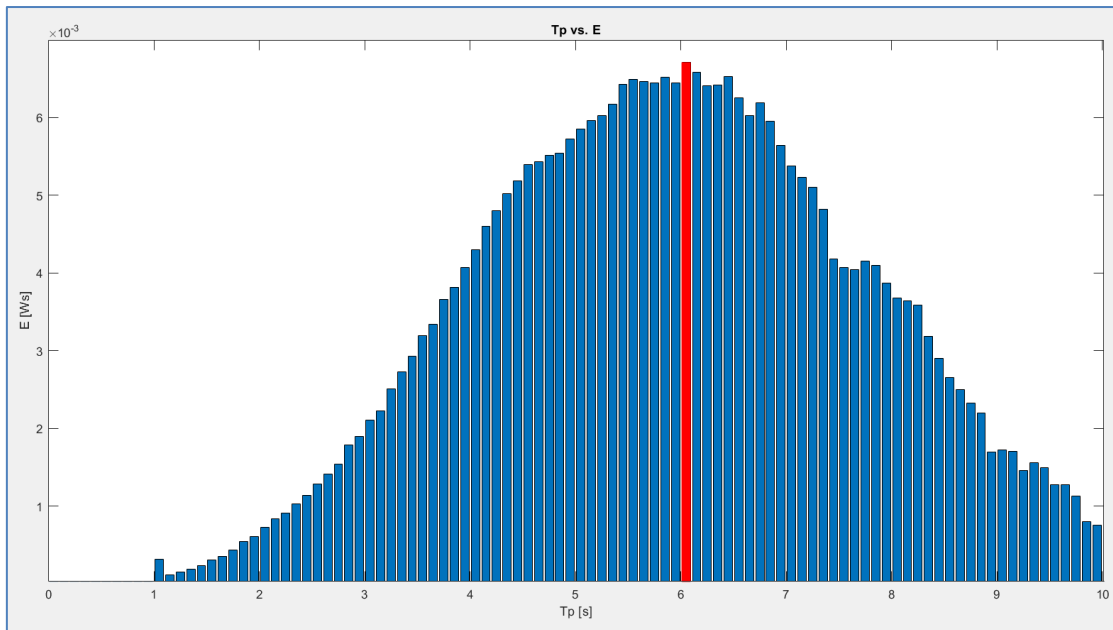


Figura 31. Energía total por franja de periodo considerada y periodo pico más energético (en rojo).

6.4. Geometría de la cámara

Conocido el periodo para el cual se desea diseñar la cámara, se pueden aplicar una amplia variedad de teorías para aproximar el movimiento del fluido a lo largo de la columna. Algunas de estas son las de Evans [5], McCormick [6] o Veer [7], que asemejan el comportamiento al de pistones con diferentes consideraciones sobre la masa de este y que se adecuarán a la realidad más o menos en función de la geometría de la cámara de oscilación.

Otra opción más precisa son los métodos de elementos de frontera, también conocidos por sus siglas en inglés como BEM (*Boundary Element Method*), que dividen la estructura en paneles y resuelven ecuaciones integrales sobre estos contornos, resultados con los cuales son capaces de obtener valores de la solución en los puntos del interior del dominio.

En el de la formulación desarrollada por Evans en 1978 [5] se considera el sistema de oscilación de la columna de agua como un pistón rígido y de masa despreciable, consideración que generalmente se aproxima a la realidad en las columnas de las OWC, debido a que el ancho de estas cámaras es mucho menor que la longitud de onda del oleaje objetivo, con lo que la agitación en su interior es reducida asemejándose más al modelo teórico y la longitud del pistón es mucho mayor que su diámetro.

Según esta formulación, se puede obtener el periodo natural (T_0) de la siguiente expresión, a partir del recorrido del agua dentro de la columna (D).

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{D}{g}} \quad (59)$$

Por otra parte, McCormick [6] considera una masa añadida para un pistón cilíndrico, en función del radio R :

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{D + 0.848R}{g}} \quad (60)$$

Finalmente, Veer [7] propone una formulación adecuada para sistemas de mayor tamaño que a priori se adecuará más al caso de estudio del presente trabajo. Esta formulación considera el término del área de la sección de la columna (S_0):

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{D + 0.41S_0^{1/2}}{g}} \quad (61)$$

De esta forma, se ha obtenido a partir de la Ecuación (59) una primera aproximación de la longitud de columna de agua, en estado de reposo, **D = 9,10m** para conseguir la resonancia con el periodo óptimo obtenido anteriormente.

A continuación, se detalla el proceso seguido para la optimización de la geometría de la cámara de oscilación.

7. Optimización mediante CFD

Para el estudio detallado del dispositivo, se han utilizado técnicas de modelización numérica de computación de dinámica de fluidos, conocida por sus siglas en inglés como CFD (*Computational Fluid Dynamics*), que permiten determinar de forma más fidedigna el comportamiento no lineal de los procesos turbulentos generados en la interacción oleaje-estructura y en la propia rotura del oleaje.

Debido al alto coste computacional de estas herramientas de cálculo, se han optado por un modelo bidimensional aplicado a diferentes periodos de oleaje y geometrías de la cámara con el fin de conseguir un diseño óptimo.

7.1. Metodología

Desarrollado por IHCantabria, este modelo numérico CFD bidimensional permite conocer los campos de presiones, velocidades y turbulencia, así como el rebase o la transmisión; todo ello en el sentido transversal al frente del oleaje. Un distintivo de este modelo frente a otros es su capacidad para determinar el comportamiento del fluido dentro de un medio poroso. Además, esta herramienta cuenta con una intuitiva interfaz gráfica y permite la generación de la geometría, del oleaje de la tipología deseada y el análisis de los resultados obtenidos, de forma rápida y sencilla.

IH-2VOF es un modelo RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), es decir, que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes, en este caso bidimensionales, partiendo de que en un flujo turbulento los campos de velocidad (u_i) y presión (p_i) en un instante de tiempo se pueden descomponer en una suma de su componente promediada ($\bar{u}$ y $\bar{p}$) y su componente turbulenta (u'_i y p'_i). El modelo de turbulencia en el que se basa esta herramienta es el k- ϵ , en el cual k es la energía cinética de turbulencia y ϵ es el ratio de disipación, que depende de la viscosidad cinemática molecular.

La resolución de las características del fluido dentro de medios porosos se realiza a partir del modelo VRANS (*Volume Averaged/Reynolds-Averaged Navier Stokes*), que integra las ecuaciones RANS de un volumen de control, cuyo tamaño es mucho mayor que el tamaño de poro, pero menor que la escala en la cual varían las características del fluido.

La lámina libre de agua se determina con la técnica VOF (*Volume Of Fluid*), que no determina la superficie de forma exacta, si no que determina los cambios de densidad dentro de cada celda, considerando que estas pueden estar llenas, vacías o en un estado intermedio, dependiendo de la relación de su densidad con respecto a la densidad del agua.

Geometría y mallado (CORAL)

IH-2VOF se vale de la herramienta de mallado CORAL, que proporciona una interfaz gráfica para el modelado de la geometría. Para generar esta geometría se ha de definir:

- **Dominio de la zona de mallado:** se recomienda que este permita un espaciado de 1,2 y 1,5 veces la longitud de onda previa a la estructura, que en este caso se han estudiado periodos en el rango de 1 a 13 segundos, con lo que se ha dividido el rango de periodos en dos grupos, para una computación más rápida de los casos de los periodos inferiores a los 8s, en los que se utilizar un tamaño de modelo de 100m y para los periodos superiores, de 180m.
- **Geometría de los elementos:** distinguiendo entre cuerpos porosos, agua y obstáculos. En el caso de los cuerpos porosos, se requerirá además la definición de sus parámetros característicos.

Es recomendable que tanto la geometría introducida para la batimetría como la del agua en el instante inicial, sobresalgan de la malla, asegurando de esta forma que todas las celdas del dominio que se encuentren dentro del cuerpo queden llenas.

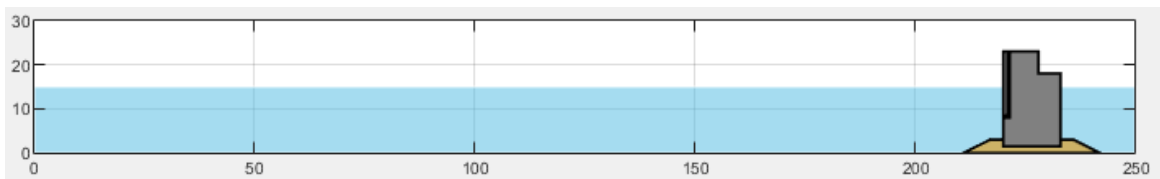


Figura 32. Ejemplo de geometría de un caso simulado en IH2VOF.

- **Malla:** que puede ser definida por subzonas y con celdas de tamaño constante o variable, siendo recomendable el uso de las primeras si es posible, dado que permiten la resolución de las diferencias finitas en primer orden, reduciendo el error de cálculo.

En el caso de olas con un importante peralte, puede que haya varias celdas llenas adyacentes a celas vacías, el modelo VOF tiende a llenar estas generando un flujo que no se corresponde con la realidad. Para evitar este fenómeno, se han de evitar pendientes ficticias superiores a los 23° con lo que, según la ecuación (62) y siguiendo la recomendación de que además la ola ha abarque al menos 10 celdas en vertical, el tamaño de la malla en la zona de la lámina libre para una ola de 1m de altura, ha de ser de $\Delta y = 0.10\text{m}$ en vertical y de $\Delta x = 0.25\text{m}$ en horizontal. En la Figura 33 se muestra un ejemplo del mallado utilizado para las simulaciones.

$$\frac{H/n_y}{L/n_x} > \tan(23^\circ) \rightarrow \frac{\Delta y}{\Delta x} > \tan(23^\circ) \rightarrow \Delta x < 2.36\Delta y \cong 2.5\Delta y \quad (62)$$

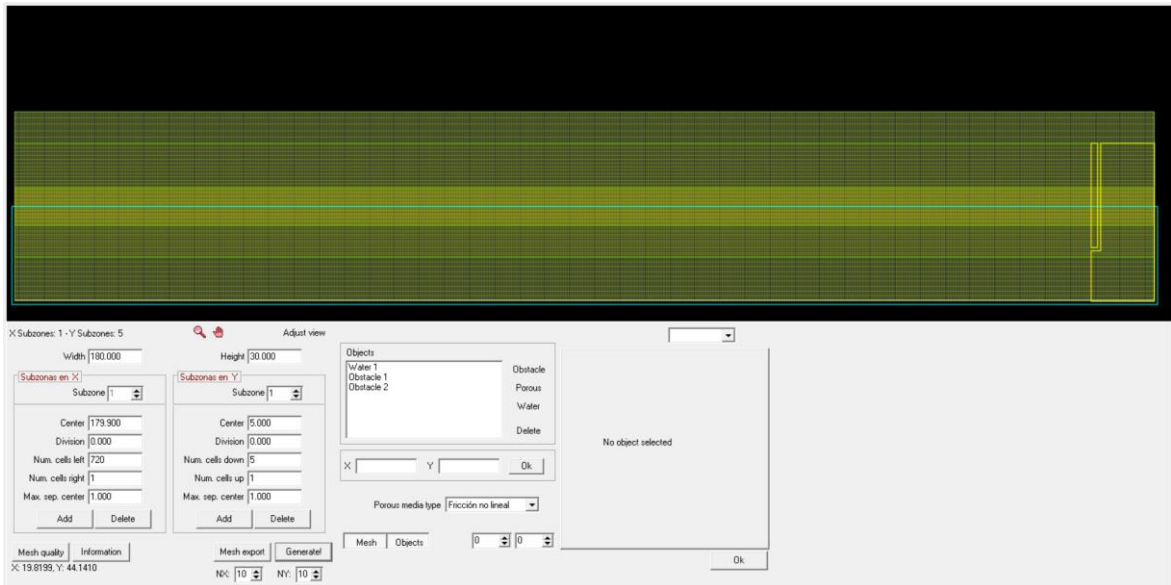


Figura 33. Ejemplo de mallado introducido en Coral.

Generación de series de oleaje

Para este trabajo, se ha recurrido a series regulares de altura de ola significativa unitaria ($H_s = 1\text{m}$) y de periodo pico variable según el caso estudiado para la determinación del periodo resonante. Se ha optado por una teoría de oleaje de Stokes de quinto orden, ya que permite modelizar con mejor precisión las no linealidades del caso y el coste computacional añadido es admisible.

En la Figura 34 se muestra un ejemplo de los datos de entrada introducidos para la generación del oleaje de uno de los casos simulados. El resultado de esta entrada se puede observar en la Figura 35.

2. Generate / import wave series

New wave series Import wave series Reconstruct wave series

New wave serie parameters

Wave series	Regular	Name	REG_H1_T6
H (m)	1	T (s)	6
fs (Hz)	30	Length (s)	220
Phase	$3\pi/2$	Theory	Stokes V
Generate wave series			

Figura 34. Ejemplo de parámetros de entrada para la generación de oleaje.

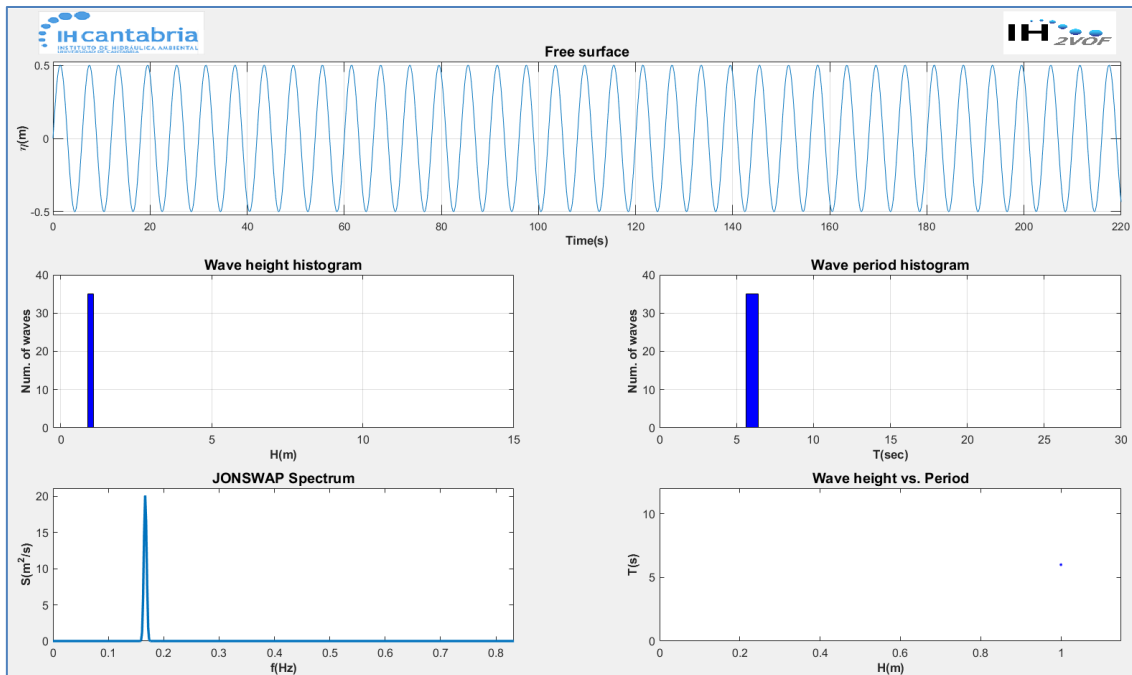


Figura 35. Ejemplo de output del generador de oleaje de IH2-VOF.

Definición de los parámetros de simulación

Los siguientes parámetros han sido fijados antes de la ejecución de cada uno de los casos:

- Duración de la simulación.
- Incremento inicial de tiempo.
- Densidad del fluido.
- Condiciones de los contornos derecho e izquierdo.
- Posición de los puntos de medición de la altura de lámina libre.

Para la simulación se ha establecido que el contorno izquierdo de la simulación absorberá la energía recibida, ya que en la realidad no existe un confinamiento hacia el lado del mar y la ola viaja libremente.

Se han colocado puntos de medición de la superficie libre junto a la margen izquierda, frente al paramento vertical del dique y en el centro de la cámara de oscilación, con el fin de poder observar la evolución del oleaje y el comportamiento de la propia cámara. Estos puntos de medida se muestran en la Figura 36.

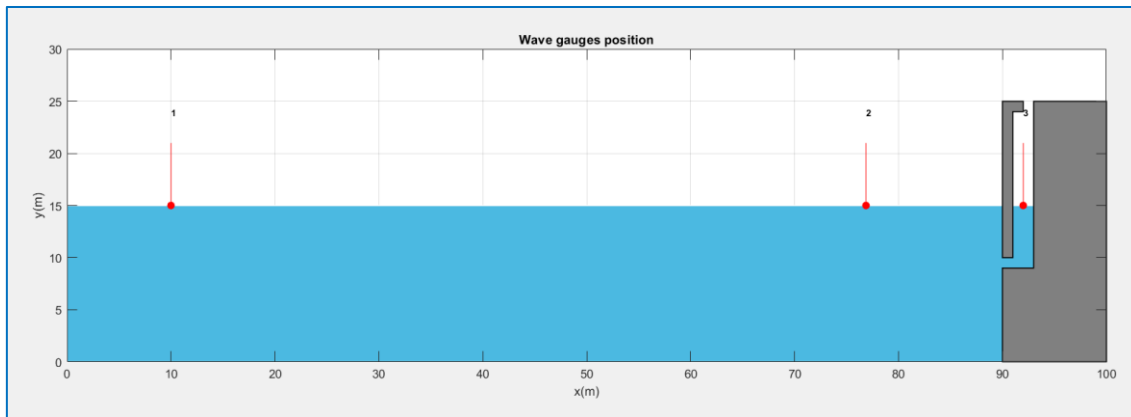


Figura 36. Puntos de medición de la superficie libre.

Se han obtenido los campos de velocidades vertical y horizontal, así como las lecturas de la superficie libre en los puntos indicados, cada 0,1 segundos a lo largo de la simulación, de 180 segundos de duración.

Proceso de cálculo

El proceso que IH-2VOF sigue para la determinación de los valores el dominio es el siguiente:

1. Cálculo de las velocidades promedio.
2. Aplicación de las condiciones de contorno en la superficie y obtención de la función de generación de oleaje.
3. Obtención del campo de presiones.
4. Aplicación de las condiciones de contorno en la superficie nuevamente.
5. Actualización de los valores $k-\epsilon$.
6. Determinación de los valores de los volúmenes de fluido (F), con el método VOF, en las celdas.
7. Aplicación de las condiciones de contorno a las celdas que se han llenado.

Una vez obtenidos los resultados de IH2-VOF, se ha procedido a tratarlos con código propio generado en Matlab para la obtención de los valores necesarios para el desarrollo del presente proyecto.

7.2. Resultados

Geometría de la cámara

Tras la simulación del comportamiento de la columna de agua oscilante frente a oleajes de altura unitaria, para los periodos de oleaje en el rango del clima marítimo de la zona de estudio, se han obtenido como *output* las variaciones de la lámina libre dentro de la cámara de oscilación medidas con respecto al nivel medio del mar.

En la Figura 37 se muestra un ejemplo del *output* de una de las simulaciones, en la que se puede observar cómo existe un fenómeno transitorio por lo que se tarda cierto tiempo en alcanzar una estabilidad en la oscilación en la OWC. Debido a este fenómeno transitorio, se ha optado por utilizar tan solo el último tercio de los datos resultantes.

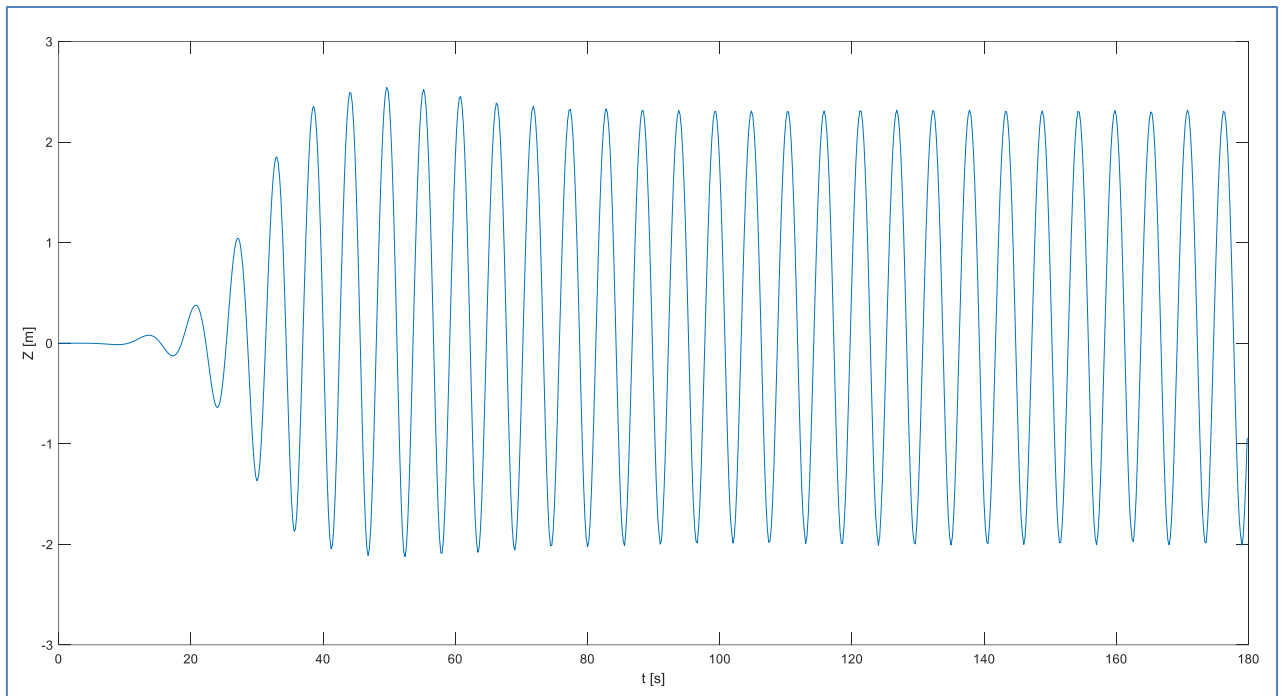


Figura 37. Ejemplo de resultados de altura de superficie libre en la cámara obtenidos en las simulaciones.

El coeficiente de amplificación se ha obtenido comparando a amplitud de la onda generada con la de la oscilación observada en la cámara:

$$C_A = \frac{A_{OWC}}{A_0} \quad (63)$$

De esta forma se han simulado diferentes geometrías en el entorno del periodo óptimo de diseño (ver capítulo 6.3) cuyos coeficientes de amplificación se muestran en la Figura 38. A la vista de estos resultados se concluye que el diseño OWC₃ es el más apropiado dado su buen comportamiento en los periodos de oleaje más energéticos, considerando además que tal y como se ha indicado en la Ecuación (58) el término de la velocidad, que va ligado a la amplitud de la oscilación, se encuentra elevado al cubo. Cabe comentar además que la teoría que más se ha ajustado a los resultados obtenidos mediante las simulaciones es la que Veer [7] propone en la Ecuación (61).

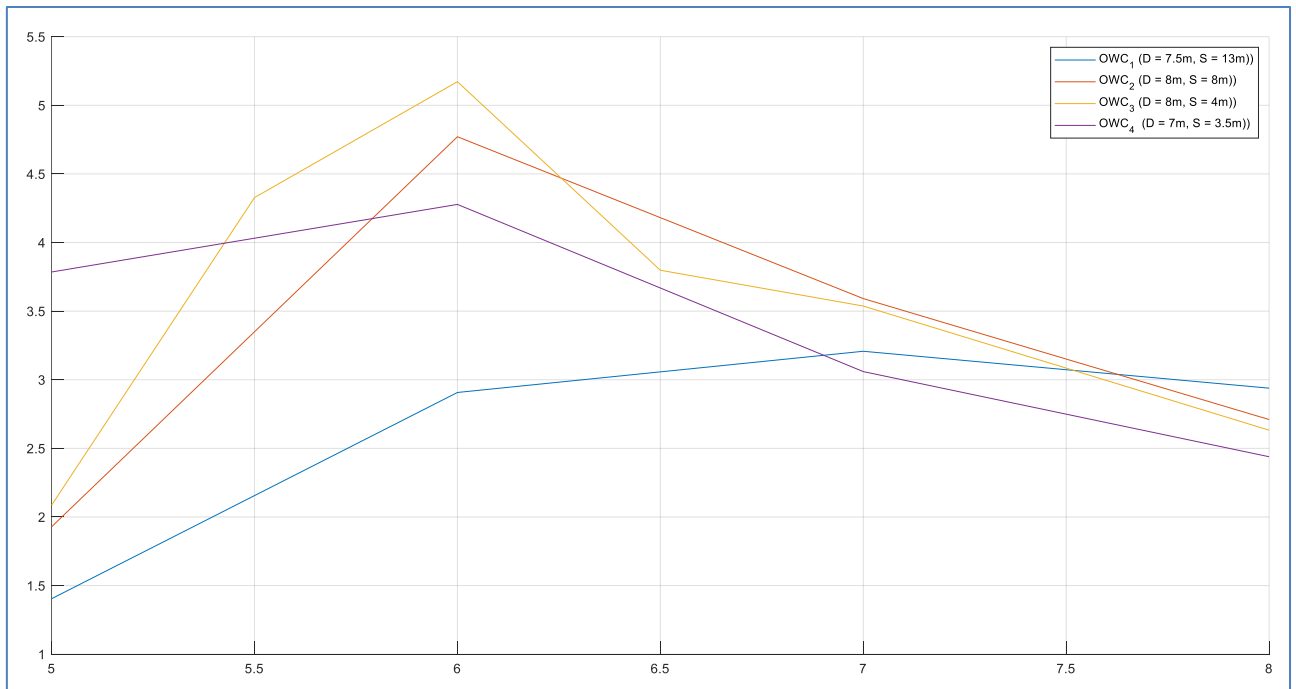


Figura 38. Comparación de los coeficientes de amplificación para diferentes geometrías de la cámara de oscilación.

La geometría final de la cámara de oscilación es por lo tanto la siguiente:

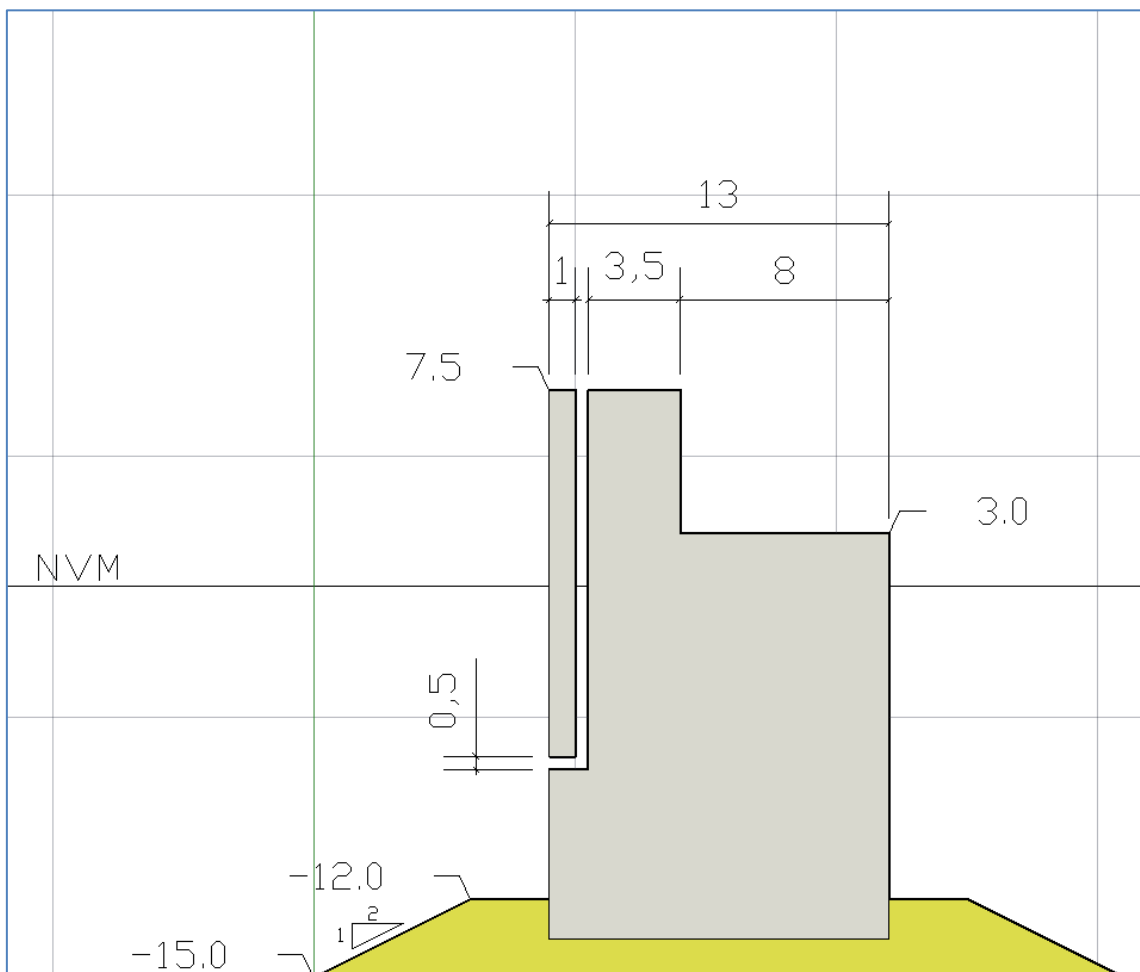


Figura 39. Geometría del dique vertical y cámara de oscilación.

Esta geometría ha sido probada bajo oleaje de diferentes periodos, cubriendo todo el rango de los estados de mar registrados en los datos históricos, de esta forma se han obtenido los resultados mostrados en la Figura 40, que muestra el desplazamiento de la lámina libre dentro de la cámara durante la simulación, así como las velocidades verticales las cuales se pueden ver en la Figura 41.

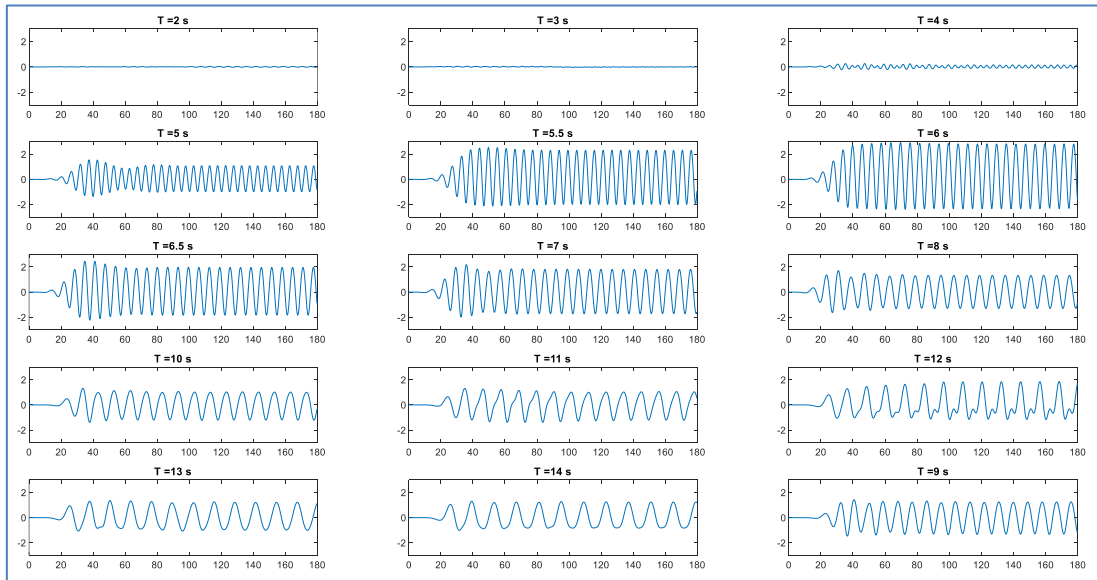


Figura 40. Variación de la lámina libre en la cámara para cada periodo de oleaje (altura [m] en el eje ordenadas y tiempo [s] en abscisas).

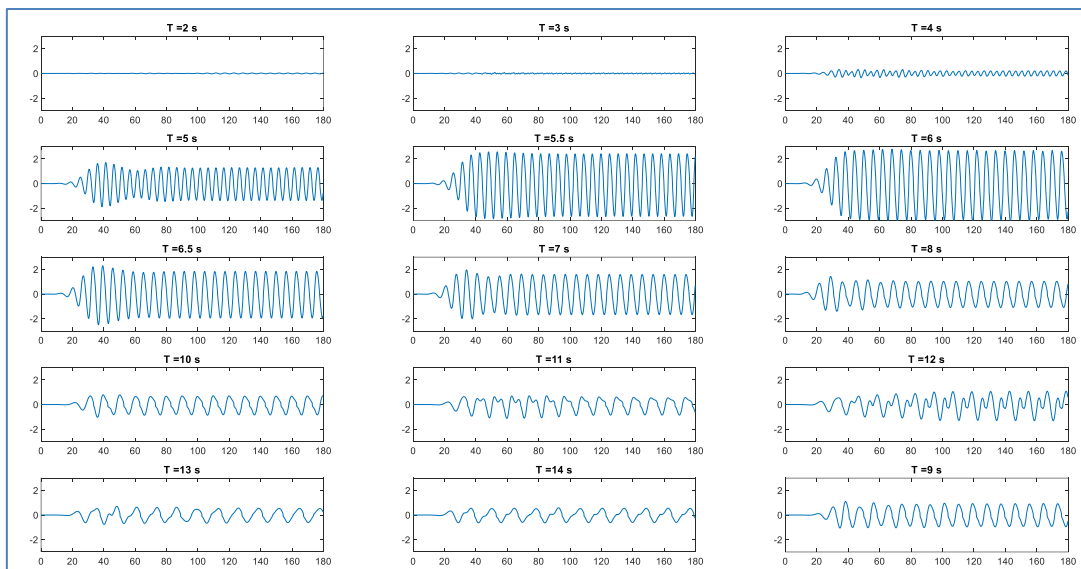


Figura 41. Velocidad vertical de la lámina libre en la cámara para cada periodo de oleaje (velocidad [m/s] en el eje ordenadas y tiempo [s] en abscisas).

Tabla 14. Amplitud de oscilación y de velocidad para cada periodo de oleaje.

T [s]	Amplitud de oscilación [m]	Amplitud de velocidad [m/s]
2	0,034	0,038
3	0,025	0,072
4	0,135	0,328
5	1,043	1,797
5,5	2,164	2,722
6	2,586	2,963
6,5	1,899	2,400
7	1,769	1,986
8	1,316	1,418
9	1,294	1,080
10	1,124	0,918
11	1,156	0,917
12	1,510	1,199
13	1,112	0,733
14	1,042	0,610

Conocida pues la amplitud de oscilación en la cámara se ha calculado el coeficiente de amplificación para cada periodo de oleaje, los cuales se muestran en la Figura 42 y Tabla 15, resultado máximo para 6 segundos tal y como se deseaba.

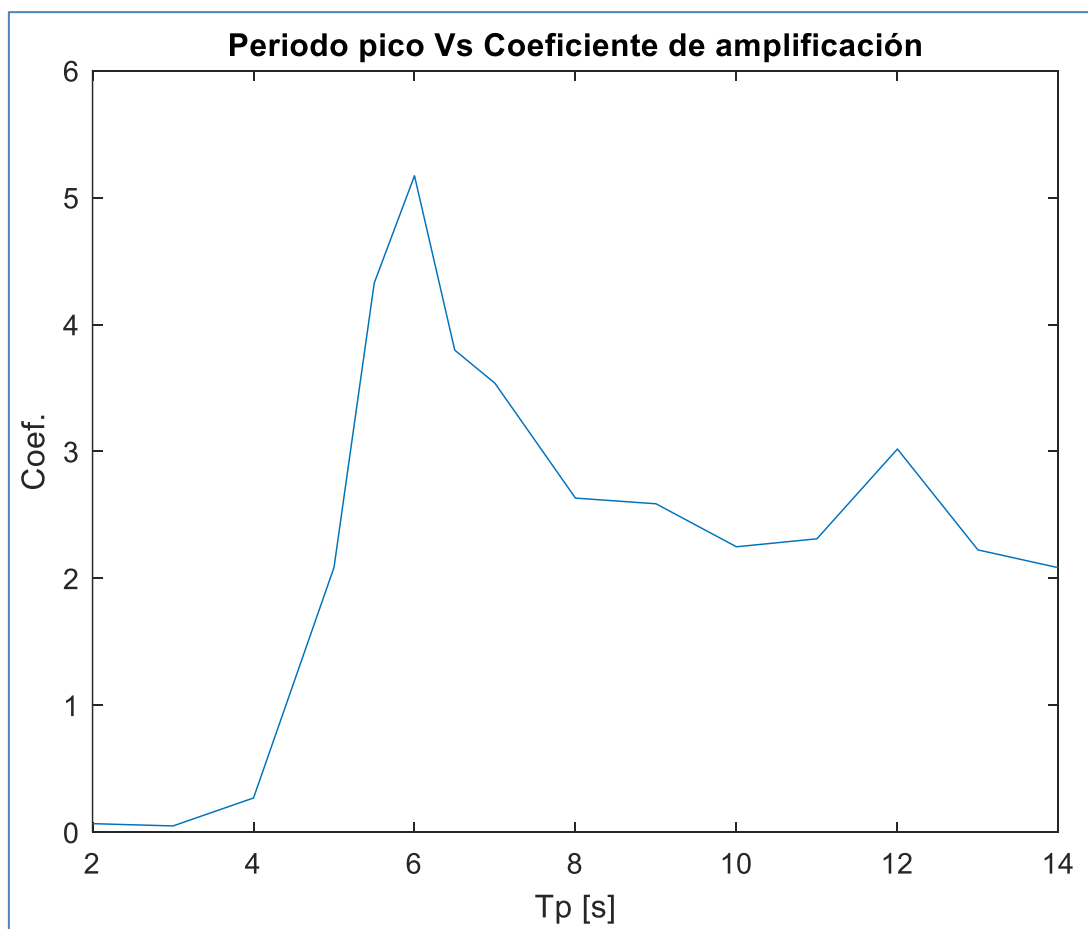


Figura 42. Coeficientes de amplificación obtenidos para cada periodo de oleaje.

Tabla 15. Coeficientes de amplificación obtenidos para cada periodo de oleaje.

T [s]	Coeficiente
2	0,068
3	0,050
4	0,270
5	2,086
5,5	4,328
6	5,172
6,5	3,798
7	3,537
8	2,632
9	2,588
10	2,249
11	2,312
12	3,019
13	2,224
14	2,084

Energía del oleaje disponible

Una vez estudiado el comportamiento de la cámara, para estimar la energía disponible para su aprovechamiento, se han discretizado los diferentes estados de mar creando una malla T_p - H_s con el respectivo conteo de sucesos para cada celda (Figura 43), siguiendo las recomendaciones de Handbook of Ocean Wave Energy [14].

Para cada punto de la malla se ha obtenido la energía por unidad de superficie que depende exclusivamente de la altura de ola (ver Tabla 16), la longitud de onda y velocidad de grupo resultante que depende del periodo (ver Tabla 17) y con ello la potencia de cada combinación de altura y periodo de oleaje utilizando la Ecuación (53) (ver Tabla 18).

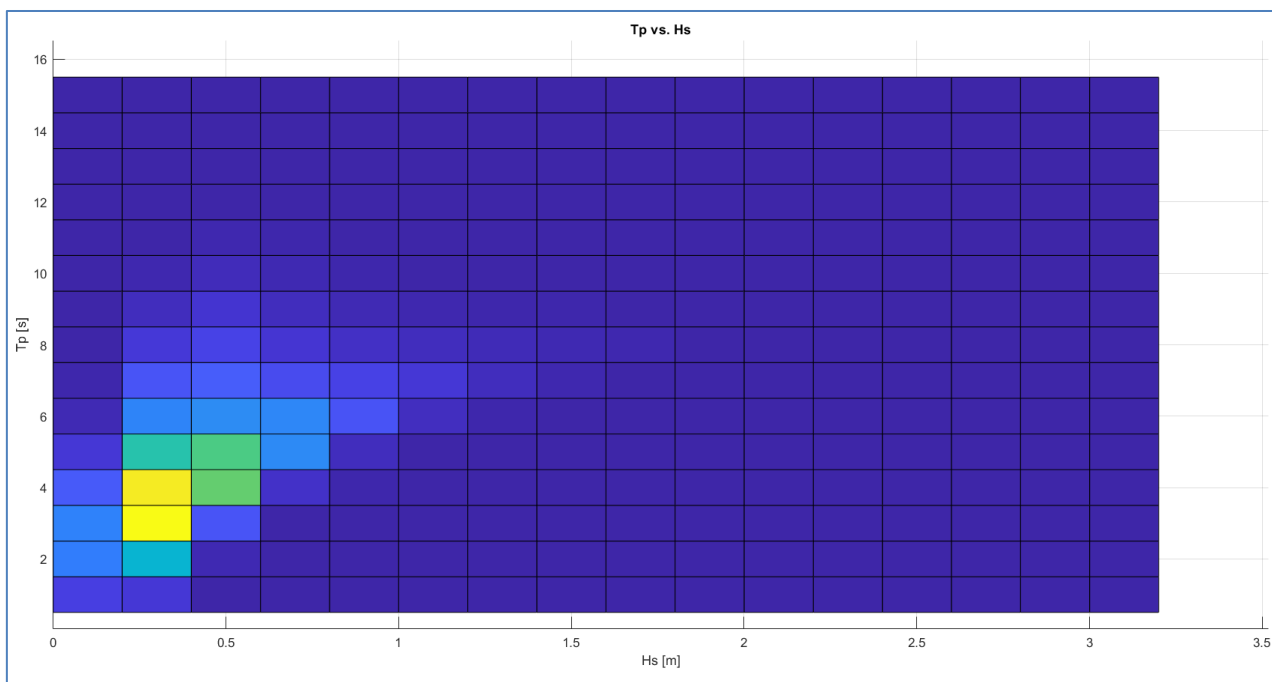


Figura 43. Discretización de los estados de mar utilizada para la estimación de la energía producida.

Tabla 16. Energía por unidad de superficie para cada altura de ola considerada.

H [m]	E [Ws/m ²]
0,1	12,57
0,3	113,12
0,5	314,23
0,7	615,88
0,9	1018,09
1,1	1520,86
1,3	2124,17
1,5	2828,04
1,7	3632,46
1,9	4537,43
2,1	5542,96
2,3	6649,03
2,5	7855,66
2,7	9162,85
2,9	10570,58
3,1	12078,87

Tabla 17. Longitud de onda y celeridad de grupo para cada periodo de oleaje considerado.

T [s]	L [m]	Cg [m/s]
1	1,56	0,78
2	6,25	1,56
3	14,05	2,34
4	24,95	3,14
5	38,46	4,13
6	53,07	5,32
7	67,63	6,50
8	81,79	7,49
9	95,57	8,28
10	109,05	8,91
11	122,29	9,40
12	135,35	9,80
13	148,27	10,12
14	161,08	10,38
15	173,79	10,59

Tabla 18. Potencia por unidad de ancho de frente de onda [kW/m] para cada estado de mar considerado.

H [m]	T [s]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,1	0,01	0,02	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
0,3	0,09	0,18	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2
0,5	0,25	0,49	0,7	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,6	2,8	3,0	3,1	3,2	3,3	3,3
0,7	0,48	0,96	1,4	1,9	2,5	3,3	4,0	4,6	5,1	5,5	5,8	6,0	6,2	6,4	6,5
0,9	0,79	1,59	2,4	3,2	4,2	5,4	6,6	7,6	8,4	9,1	9,6	10,0	10,3	10,6	10,8
1,1	1,19	2,37	3,6	4,8	6,3	8,1	9,9	11,4	12,6	13,6	14,3	14,9	15,4	15,8	16,1
1,3	1,66	3,32	5,0	6,7	8,8	11,3	13,8	15,9	17,6	18,9	20,0	20,8	21,5	22,0	22,5
1,5	2,21	4,42	6,6	8,9	11,7	15,1	18,4	21,2	23,4	25,2	26,6	27,7	28,6	29,3	30,0
1,7	2,84	5,67	8,5	11,4	15,0	19,3	23,6	27,2	30,1	32,4	34,2	35,6	36,8	37,7	38,5
1,9	3,54	7,08	10,6	14,3	18,7	24,2	29,5	34,0	37,6	40,4	42,7	44,5	45,9	47,1	48,1
2,1	4,33	8,65	13,0	17,4	22,9	29,5	36,0	41,5	45,9	49,4	52,1	54,3	56,1	57,5	58,7
2,3	5,19	10,3	15,6	20,9	27,4	35,4	43,2	49,8	55,1	59,2	62,5	65,2	67,3	69,0	70,4
2,5	6,13	12,2	18,4	24,7	32,4	41,8	51,0	58,8	65,1	70,0	73,9	77,0	79,5	81,5	83,2
2,7	7,15	14,3	21,5	28,8	37,8	48,8	59,5	68,6	75,9	81,6	86,2	89,8	92,7	95,1	97,0
2,9	8,25	16,5	24,8	33,2	43,6	56,3	68,7	79,1	87,5	94,2	99,4	104	107	110	112
3,1	9,43	18,8	28,3	38,0	49,8	64,3	78,5	90,4	100	108	114	118	122	125	128
Tot.	54	107	161	216	283	365	445	513	568	611	645	672	694	711	726

Multiplicando la potencia de cada combinación H-T por la probabilidad de ocurrencia de cada estado de mar se obtiene la potencia media disponible del oleaje en cada uno (Tabla 20), cuyo sumatorio resulta una potencia disponible de **1,68 kW/m**.

Tabla 19. Potencia media disponible por unidad de ancho de frente de onda [W/m] para cada estado de mar considerado.

H [m]	T [s]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,1	0.11	0.64	1.00	0.82	0.41	0.16	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,3	0.71	9.85	33.2	42.6	31.0	21.2	14.0	7.46	3.37	1.17	0.31	0.08	0.00	0.00	0.00
0,5	0.01	0.87	14.0	78.5	98.0	63.9	44.9	30.0	18.9	8.79	3.10	1.07	0.13	0.00	0.00
0,7	0.00	0.02	0.69	11.0	94.1	118	61.1	34.4	19.9	9.62	3.56	0.78	0.04	0.00	0.00
0,9	0.00	0.00	0.06	1.58	14.8	101	80.1	40.4	19.6	5.97	1.07	0.47	0.02	0.00	0.00
1,1	0.00	0.00	0.01	0.31	2.92	33.0	77.6	42.4	15.5	4.71	0.80	0.53	0.05	0.00	0.00
1,3	0.00	0.00	0.00	0.02	0.67	9.16	50.4	41.4	15.3	5.59	0.78	0.53	0.07	0.00	0.00
1,5	0.00	0.00	0.00	0.05	0.28	1.68	19.8	35.5	16.9	3.83	1.08	0.37	0.24	0.00	0.00
1,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.42	6.21	28.8	13.9	5.63	1.04	0.30	0.12	0.00	0.00
1,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	2.64	16.2	16.6	4.98	1.37	0.90	0.15	0.00	0.00
2,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	2.38	14.9	6.58	1.67	0.64	0.19	0.00	0.00
2,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	5.11	7.90	4.22	0.22	0.00	0.00	0.00
2,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	2.48	1.75	1.69	0.00	0.00	0.00
2,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00	0.00
2,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tot.	0.83	11.4	49.0	135	242	349	357	279	161	67.3	20.7	8.19	1.03	0.00	0.00

A partir de estos valores, se ha determinado la energía a anual total del oleaje por unidad de longitud de frente de onda (Tabla 20), parte de la cual podrá ser aprovechada por el dispositivo de extracción de energía.

Tabla 20. Energía anual total por unidad de ancho de frente de onda [MW/m] para cada estado de mar considerado.

H [m]	T [s]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,1	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,3	0,01	0,09	0,29	0,37	0,27	0,19	0,12	0,07	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,01	0,12	0,69	0,86	0,56	0,39	0,26	0,17	0,08	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00
0,7	0,00	0,00	0,01	0,10	0,82	1,04	0,54	0,30	0,17	0,08	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00
0,9	0,00	0,00	0,00	0,01	0,13	0,88	0,70	0,35	0,17	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
1,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,29	0,68	0,37	0,14	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
1,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,08	0,44	0,36	0,13	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
1,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,17	0,31	0,15	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
1,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,25	0,12	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
1,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,14	0,15	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
2,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,13	0,06	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
2,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,07	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
2,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
2,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tot.	0,01	0,10	0,43	1,18	2,12	3,05	3,13	2,45	1,41	0,59	0,18	0,07	0,01	0,00	0,00

Realizando el sumatorio, se obtiene que la potencia anual del oleaje es de **14,73 MWh/m/año**.

Energía producida

La energía producida es una fracción de la presente en el oleaje y es la generada por el flujo de aire que acciona la turbina, solidaria al rotor del generador eléctrico. Esta energía extraíble depende pues de la potencia neumática, tal y como se ha explicado en el capítulo 6.2, que a su vez depende de la velocidad del flujo, considerando un rendimiento del sistema de extracción de energía constante del 55%.

Aplicando la ecuación (58) a las mediciones de las velocidades verticales obtenidas en las simulaciones y promediando estos valores a lo largo del ciclo de la onda, se ha realizado el cálculo de la potencia generada por metro lineal de cámara de oscilación para cada celda. Estos resultados se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Potencia promediada en el ciclo, extraída por metro lineal de cámara de oscilación [kW/m] para cada estado de mar considerado.

H [m]	T [s]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.17	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.31	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.52	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.79	0.08	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
1,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	1.16	0.11	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
1,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	1.61	0.16	0.04	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
2,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	2.18	0.22	0.05	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
2,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	2.86	0.28	0.07	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01
2,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	3.67	0.36	0.09	0.02	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01
2,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	4.63	0.46	0.12	0.03	0.01	0.01	0.04	0.00	0.00	0.01
2,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	5.73	0.57	0.14	0.04	0.01	0.01	0.06	0.00	0.00	0.01
3,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	7.00	0.69	0.18	0.05	0.01	0.01	0.07	0.00	0.00	0.01
Tot.	0.00	0.00	0.00	0.00	1.47	30.8	3.04	0.77	0.21	0.05	0.04	0.30	0.02	0.01	0.06

Multiplicando estos valores por la probabilidad de ocurrencia de su estado de mar asociado se obtiene la potencia media generada por metro lineal de cámara de oscilación, cuyo sumatorio es una potencia media extraída de **10,76 W/m**.

Con estos valores se han determinado las energías extraídas anualmente presentadas en la Tabla 23.

Tabla 22. Potencia media extraída por metro lineal de cámara de oscilación [W/m] para cada estado de mar considerado.

H [m]	T [s]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.22	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	1.12	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	2.91	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	3.19	0.21	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.28	0.24	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.19	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tot.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	9.25	0.96	0.20	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 23. Energía media anual extraída por metro lineal de cámara de oscilación [kWh/m/año] para cada estado de mar considerado.

H [m]	T [s]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	1.96	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	9.84	0.56	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,7	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	25.5	1.07	0.13	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	27.9	1.80	0.20	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	11.8	2.13	0.26	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	3.67	1.63	0.30	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.77	0.74	0.29	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.26	0.27	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.12	0.17	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
2,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3,1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tot.	0.00	0.00	0.00	0.00	2.70	81.1	8.43	1.75	0.27	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00

Realizando el sumatorio, se obtiene que la energía generada anualmente es de **94,25 kWh/m/año**.

Comparando la energía extraída con la máxima que podría proporcionar el oleaje en condiciones ideales, se obtiene un rendimiento global de:

$$\eta = \frac{E_{owc}}{E_{oleaje}} = 0,0061 \quad (64)$$

Con lo que el rendimiento global, de la ola a la red eléctrica, resulta de **0,61%**.

Teniendo en cuenta que el consumo medio de un hogar en España es de 3,49 MWh/año, se requieren 37m de longitud de cámara para generar suficiente electricidad para mantenerlo. Así pues, una cámara de **100 m** de longitud podría proporcionar una energía total de **9,425 MWh/año**, pudiendo satisfacer parte de la demanda energética del Puerto de Alicante con un medio de producción totalmente renovable y de emisiones nulas, reduciendo así la huella de carbono de la ampliación del dique.

8. Conclusiones

Las conclusiones finales extraídas del presente documento se resumen a continuación:

8.1. Clima marítimo

A partir de la información de las bases de dato DOW, GOS y GOT y de los datos batimétricos se ha concluido lo siguiente:

- La batimetría frente a la zona de implantación de la cámara de oscilación presenta **pendientes suaves de 1/250 y profundidades entorno a los 15 m**.
- El clima marítimo en el Puerto de Alicante es típico de la costa mediterránea española, con alturas de ola reducidas mayoritariamente inferiores a 3 m de altura, que proceden casi en su totalidad del sector ENE (Figura 44).
- Una vez realizado el **análisis POT** sobre los datos GOW, se ha concluido que el mejor ajuste se produce para una función **GEV de parámetros: k = 0,198583, σ = 0,07185 y μ= 2,3383**.
- La carrera de mareas astronómica en Alicante presenta los valores más reducidos de toda España, con una diferencia de aproximadamente 20 cm entre su nivel máximo y mínimo, por ello se toma como referencia para el nivel del mar en España. En cuanto la marea meteorológica, sigue siendo reducida, llegando pocas veces a niveles del mar superiores a los 40 cm.

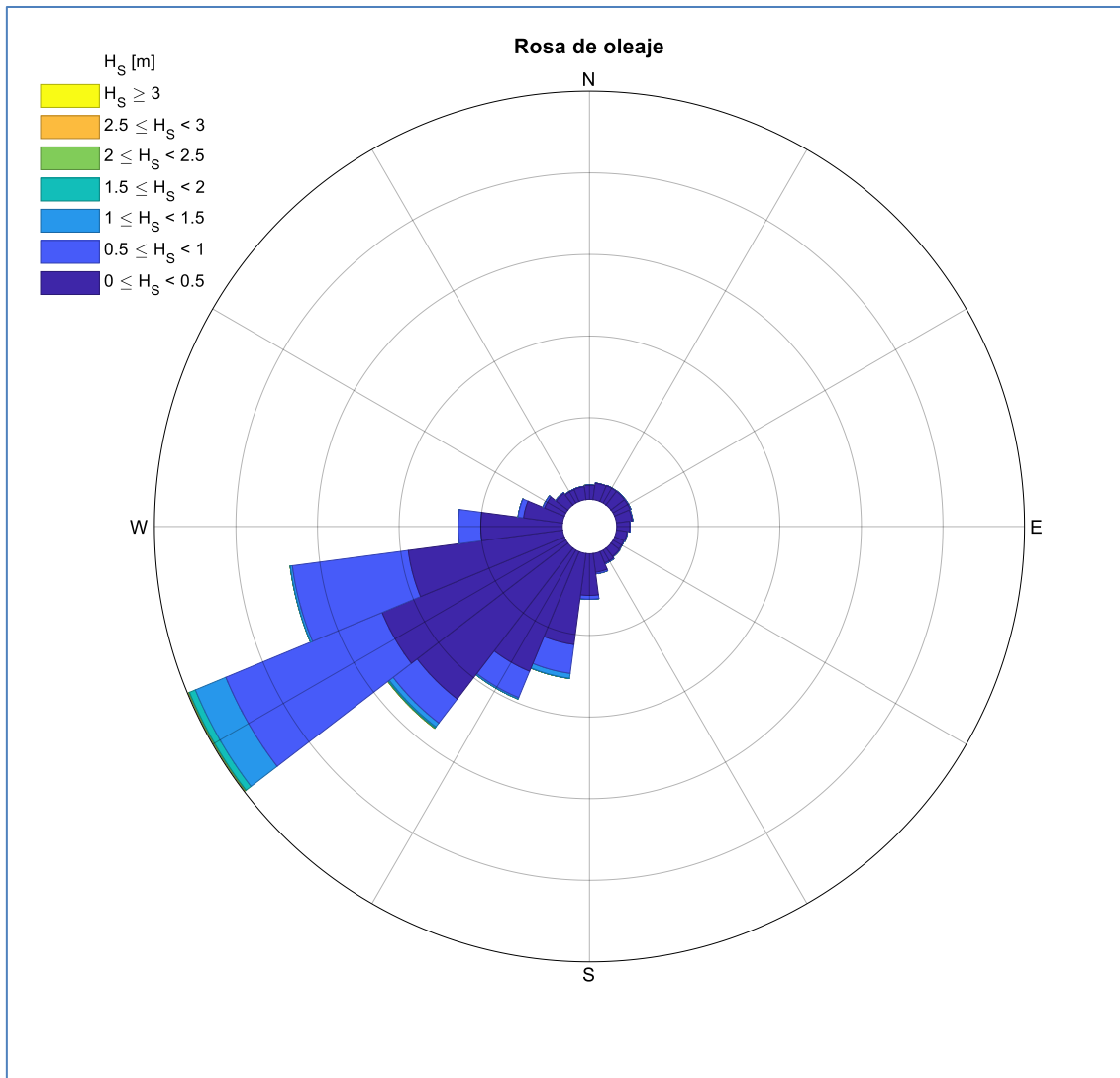


Figura 44. Rosa de oleaje obtenida con los datos del punto DOW.

8.2. Diseño estructural

La **geometría final de la estructura**, para cumplir con las condiciones de estabilidad y funcionalidad del dique es la mostrada en la Figura 45. Y se ha determinado de la siguiente forma:

- Utilizando los criterios de diseños propuestos por la ROM 0.0-01 [1], se ha concluido que la vida útil ha de ser 25 años y probabilidad de fallo durante esta de un máximo de 10%. Así pues, el periodo de retorno se ha establecido en 237,8 años y la altura de ola **significante correspondiente es de 3,05 m.**
- La altura de coronación del espaldón del dique vertical ha sido dimensionada según el EuroTop 2018 [12], para un rebase medio de 0,3 L/s/m como máximo, de forma que se permita la presencia de personas sobre el dique. El francobordo resultante ha sido de 7,12 m con que, considerando las mareas astronómicas de la zona, se ha adoptado un valor constructivo de **coronación de 7,5 m.**
- Para la determinación de la manga del cajón que conforma el cuerpo central del dique vertical, dado que no se espera rotura del oleaje sobre el paramento vertical del dique, se ha utilizado la formulación de Goda (1985) [9], con el objetivo de obtener valores de coeficientes de seguridad frente a deslizamiento

y vuelco superiores a 1,5. De esta forma, se ha adoptado el valor constructivo de **13,0 m de manga de cajón**, para el cual se consiguen coeficientes de seguridad para deslizamiento y vuelco de 2,65 y 1,53 respectivamente.

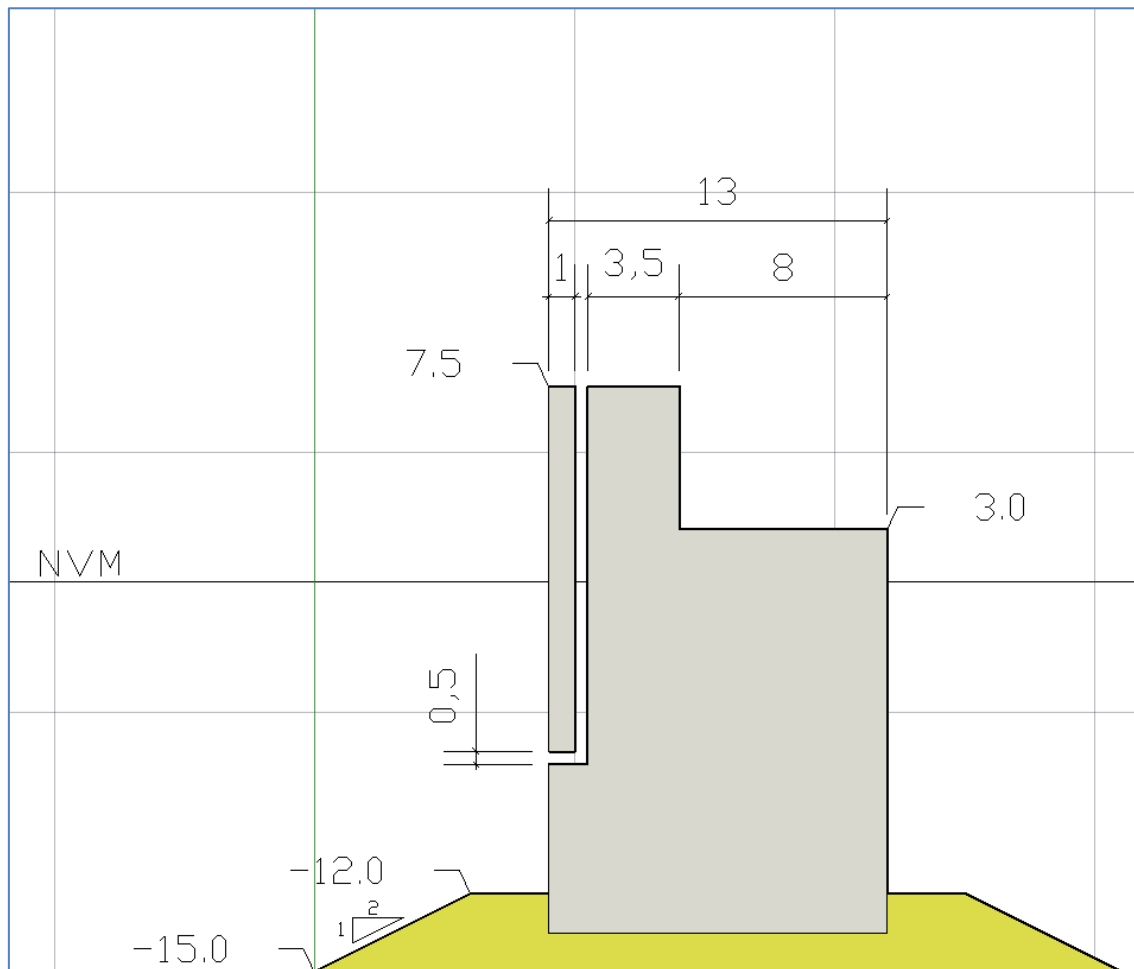


Figura 45. Geometría final de la sección transversal de la estructura.

8.3. Diseño de la cámara de oscilación

Utilizando la formulación desarrollada en el Capítulo 6, se han obtenido los siguientes resultados:

- El **periodo óptimo de diseño**, para el cual se da el máximo de energía por unidad de superficie promediado a lo largo del tiempo, es de **6,05 segundos**.
- La formulación propuesta por **Veer [7]**, **mostrada en la Ecuación (61)**, se ha ajustado a los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con el software **IH2VOF**, con las cuales se ha obtenido la **geometría de cámara de oscilación** de la Figura 45.
- La **energía undimotriz disponible** en el Puerto de Valencia es de **14,73 MWh/m/año**, concentrada en el rango de periodos de 4 a 8 segundos y alturas de 0,5 a 1,5 metros.

Tras las múltiples simulaciones de diversas geometrías y estados de mar se concluye lo siguiente:



- La geometría propuesta permite una **generación anual** de **94,25 kWh/m/año**, amplificando de forma efectiva la oscilación del nivel del agua dentro de la cámara para el periodo más energético.
- Una cámara con tecnología OWC podría abastecer una parte importante de la demanda energética del Puerto de Alicante, proporcionando **9,43 MWh anuales de energía renovable**, reduciendo la huella de carbono de la ampliación.
- Además, se reduce el coeficiente de reflexión en la ampliación del dique del muelle de poniente a causa del propio mecanismo de absorción de energía, de manera que **se mejoran las condiciones de navegabilidad** de los buques al acceder a la dársena de levante, cuya bocana se encuentra frente a la zona de implantación.

9. Bibliografía

- [1] Ministerio de Fomento. Puertos del Estado. ROM 0.0-01 de “Procedimiento general y bases de Cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias”.
- [2] Ministerio de Fomento. Puertos del Estado. ROM 0.3-91 de “Acciones Medioambientales I: Oleaje”.
- [3] Ministerio de Fomento. Puertos del Estado. ROM 1.0-09 de “Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. Agentes climáticos)”.
- [4] Ministerio de Fomento. Puertos del Estado. ROM 3.1-99 de “Proyecto de la configuración marítima de los puertos; canales de acceso y áreas de flotación”.
- [5] Evans, D.V. (1978). *The Oscillating Water Column Wave-energy Device*.
- [6] McCormick, M.E. (2007). *Ocean Wave Energy Conversion*.
- [7] Veer, R. V. Thorlen, H. J. (2008). *Added Resistance Of Moonpool In Calm Water*,
- [8] Tanimoto, K. Yagyu, T. Goda, Y. (1982). *Irregular Wave Tests For Composite Breakwater Foundations*.
- [9] Goda, Y. (1985). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Tokyo.
- [10] Takao, M. Fukuma, S. Okuhara, S. Alam, M. Kinoue, Y. (2019). *Performance Comparison Of Turbines For Bi-Directional Flow*.
- [11] Folley, M. Curran, R. Whittaker, T. *Comparison of LIMPET contra-Rotating Wells Turbine With Theoretical And Model Test Predictions*.
- [12] Van der Meer, J.W. Allsop, N.W.H. Bruce, T. De Rouck, J. Kortenhaus, A. Pullen, T. Schüttrumpf, H. Troch, P. Zanuttigh, B. (2018). *EurOtop, 2018. Manual On Wave Overtopping Of Sea Defences And Related Structures. An Overtopping Manual Largely Based On European Research, But For Worldwide Application*.
- [13] Takahashi, S. Tanimoto, K. Shimosako, K. (1993). *Experimental Study of Impulsive Pressures on Composite Breakwaters-Fundamental Feature of Impulsive Pressure and the Impulsive Pressure Coefficient*.
- [14] Pecher, A. Kofoed, J. (2017). *Introduction*. In A. Pecher, & J. P. Kofoed (Eds.), *Handbook of Ocean Wave Energy*.
- [15] Penalba, M. Ringwood, J. (2016). *A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters*. *Energies*.
- [16] Pecher, A. Kofoed, J. (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy. Volume 7*.
- [17] Evans, D. Porter, R. (1995). *Hydrodynamic Characteristics Of An Oscillating Water Column Device*.
- [18] Vicanza, D. Di Lauro, E. Contestabile, P. Gissoni, C. López, J. Loseada, I. (2019). *Review Of Innovative Harbor Breakwaters For Wave-Energy Conversion*.
- [19] Baudry, V. Babarit, A. Clement, A. (2013). *An Overview Of Analytical, Numerical And Experimental Methods For Modelling Oscillating Water Columns*.
- [20] Shenh, W. Lewis, T. Alcorn, R. (2014). *Hydrodynamics of OWC Wave Energy Converters*.



- [21] Sundar, V. Todalshaug, J. Moan, T. (2010). *Conceptual Design Of OWC Wave Energy Converters Combined With Breakwater Structures.*
- [22] Heath, T. (2012). *A Review Of Oscillating Water Columns.*
- [23] Shehata, A. Saqr, K. Xiao, Q. Day, A. (2017). *Wells Turbine For Wave Energy Conversion: A Review.*

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del puerto de Alicante.	1
Figura 2. Plano general del puerto de Alicante. Obtenido en: https://www.puertoalicante.com/wp-content/uploads/2021/06/plano-general-para-memoria-2020.pdf	2
Figura 3. Imagen de satélite del Muelle de Poniente y zona de implantación (en rojo) superpuesta.	2
Figura 4. Distribución global de la energía de oleaje anual según WorldWaves.	4
Figura 5. Mecanismo de captura de la energía del oleaje.	4
Figura 6. Oscilación de agua dentro de la OWC y dirección del flujo de aire turbinado.	5
Figura 7. Esquema de funcionamiento de una turbina Wells. Obtenido en: Comparison of LIMPET contra-rotating wells turbine with theoretical and model test predictions [11].	6
Figura 8. Esquema de funcionamiento de una turbina de impulsión. Obtenido en: Performance comparison of turbines for bi-directional flow [10].	6
Figura 9. Comparativa de rendimientos en base al ratio de coeficiente de flujo (ϕ) frente a coeficiente de flujo óptimo (ϕ_{η}). Obtenido en [15].	7
Figura 10. Sección de un dique vertical con cámara disipadora y resonante. Obtenido en: ROM 1.0-09 [3].	8
Figura 11. Proceso de ejecución de cajones. Obtenido en: http://ycivilengineering.blogspot.com/2012/08/ingenieria-maritima-y-costera.html	9
Figura 12. Sección longitudinal y transversal del buque. Obtenido en: https://es.wikipedia.org/wiki/Calado_(n%C3%A1utica)#/media/Archivo:Ship_main_dimensions.svg	12
Figura 13. Batimetría de la zona de estudio.	20
Figura 14. Rosa de oleaje resultante de los datos DOW.	21
Figura 15. Comparación de ajuste de la función GEV para los umbrales de 2.00m (en marrón) y 2.25m (en azul).	22
Figura 16. POT vs Máximos Anuales.....	23
Figura 17. Ajuste del régimen extremal a una función GEV para un umbral de 2.25m.	24
Figura 18. Ajuste de la curva Hs-Tp, realizado con Curve Fitting Tool en Matlab.....	25
Figura 19. Niveles del mar horarios debidos a las mareas astronómicas del punto GOT.	26
Figura 20. Niveles de mar horarios debidos a las mareas meteorológicas del punto GOS.	26
Figura 21. Geometría aproximada del dique.....	27
Figura 22. Valores de caudal medio y volumen máximo de rebase admisibles, según EuroTop (2018) [12].	28
Figura 23. Diagrama para la determinación de la formulación de cálculo de rebase, según EuroTop (2018) [12].	28
Figura 24. Organigrama de modos de fallo facilitado por la ROM 1.0-09 [3].	30
Figura 25. Esquema de las variables aplicar en la formulación de Tanimoto (1982). Obtenido en: Tanimoto (1982) [8].	30
Figura 26. Variables geométricas y presiones consideradas en la formulación de Goda (1985) [9].	33
Figura 27. Ábaco para la obtención del parámetro α_{11} Takahashi et al.1994 [13].	36
Figura 28. Esquema de la columna de agua para la obtención de la energía.....	38

Figura 29. Conteo de los eventos registrados para cada rango de periodo pico y altura de oleaje.	42
Figura 30. Conteo de los eventos registrados para cada rango de periodo pico y energía de oleaje.	42
Figura 31. Energía total por franja de periodo considerada y periodo pico más energético (en rojo).	43
Figura 32. Ejemplo de geometría de un caso simulado en IH2VOF.	45
Figura 33. Ejemplo de mallado introducido en Coral.	46
Figura 34. Ejemplo de parámetros de entrada para la generación de oleaje.	46
Figura 35. Ejemplo de output del generador de oleaje de IH2-VOF.	47
Figura 36. Puntos de medición de la superficie libre.	48
Figura 37. Ejemplo de resultados de altura de superficie libre en la cámara obtenidos en las simulaciones.	49
Figura 38. Comparación de los coeficientes de amplificación para diferentes geometrías de la cámara de oscilación.	50
Figura 39. Geometría del dique vertical y cámara de oscilación.	50
Figura 40. Variación de la lámina libre en la cámara para cada periodo de oleaje (altura [m] en el eje ordenadas y tiempo [s] en abscisas).	51
Figura 41. Velocidad vertical de la lámina libre en la cámara para cada periodo de oleaje (velocidad [m/s] en el eje ordenadas y tiempo [s] en abscisas).	51
Figura 42. Coeficientes de amplificación obtenidos para cada periodo de oleaje.	52
Figura 43. Discretización de los estados de mar utilizada para la estimación de la energía producida.	54
Figura 44. Rosa de oleaje obtenida con los datos del punto DOW.	61
Figura 45. Geometría final de la sección transversal de la estructura.	62

Índice de Tablas

Tabla 1. Características del buque de diseño.	12
Tabla 2. Clasificación en función del IRE.	14
Tabla 3. Clasificación en función del ISA.	15
Tabla 4. Vida útil mínima propuesta por la ROM 0.0-01 en función del IRE.....	16
Tabla 5. Máximas probabilidades conjuntas de fallo propuesta por la ROM 0.0-01 en función del ISA.....	16
Tabla 6. Método de verificación propuesto por la ROM 0.0-01 en función del ISA e IRE.	17
Tabla 7. Clasificación en función del IREO.....	18
Tabla 8. Clasificación en función del ISAO.....	18
Tabla 9. Operatividad mínima.	18
Tabla 10. Máximo número medio de paradas anuales.	19
Tabla 11. Duración máxima de parada, expresada en horas.	19
Tabla 12. Resultados obtenidos de la formulación de Goda (1985).	37
Tabla 13. Esfuerzos y coeficientes de seguridad obtenidos.....	38
Tabla 14. Amplitud de oscilación y de velocidad para cada periodo de oleaje.	52
Tabla 15. Coeficientes de amplificación obtenidos para cada periodo de oleaje.....	53
Tabla 16. Energía por unidad de superficie para cada altura de ola considerada.	54
Tabla 17. Longitud de onda y celeridad de grupo para cada periodo de oleaje considerado.	55
Tabla 18. Potencia por unidad de ancho de frente de onda [kW/m] para cada estado de mar considerado.....	55
Tabla 19. Potencia media disponible por unidad de ancho de frente de onda [W/m] para cada estado de mar considerado.	56
Tabla 20. Energía anual total por unidad de ancho de frente de onda [MW/m] para cada estado de mar considerado.....	57
Tabla 21. Potencia promediada en el ciclo, extraída por metro lineal de cámara de oscilación [kW/m] para cada estado de mar considerado.....	58
Tabla 22. Potencia media extraída por metro lineal de cámara de oscilación [W/m] para cada estado de mar considerado.	59
Tabla 23. Energía media anual extraída por metro lineal de cámara de oscilación [kWh/m/año] para cada estado de mar considerado.....	59

ANEXO: CÓDIGO UTILIZADO (MATLAB)

```
%% Análisis POT acorde con la ROM 0.3-91

load('DOW_ALICANTE.mat')

Hs = data.hs;
Tp = data.tp;

T_ef = (length(data.hs)/24/365); % Tiempo efectivo de medida, en años
H_ST = 1.00; % Umbral: Tabla 2.5.4.1, Zona VII
H_1 = 2.00; % Segundo umbral: Tabla 2.5.4.1, Zona VII

% Recorrer el vector data.hs y ver qué valores quedan sobre el umbral
% Guardar en booleano los valores sobre el pico

j = 0;
clc
duraciones(1) = 0;

for i = 1:length(data.hs);
    if data.hs(i) >= H_ST
        umbral(i) = 1;

        if data.hs(i-1) < H_ST
            j = j+1;
            duraciones(j) = 0;
        end
        duraciones(j) = duraciones(j)+1;

    else
        umbral(i) = 0;
    end
end

% Obtencion de número de tormentas por año (n)

n = 0; % Numero de tormentas
for i = 1:(length(umbral)-1);
    if umbral(i) == 0 && umbral(i+1) == 1;
        n = n + 1;
    end
end

lambda = n/T_ef;
Duracion_temporal = sum(umbral)/n; % Duracion media de los temporales (Tm)

% Obtencion de número de tormentas por año con el segundo umbral (n1)

j = 0;
duraciones_1(1) = 0;

for i = 1:length(data.hs)
    if data.hs(i) >= H_1
        umbral_1(i) = 1;
```

```
        if data.hs(i-1) < H_1
            j = j+1;
            duraciones_1(j) = 0;
        end
        duraciones_1(j) = duraciones_1(j)+1;

    else
        umbral_1(i) = 0;
    end
end

n_1 = 0; % Numero de tormentas
for i = 1:(length(umbral_1)-1);
    if umbral_1(i) == 0 && umbral_1(i+1) == 1;
        n_1 = n_1 + 1;
    end
end

lambda_1 = n_1/T_ef;
Duracion_temporal_1 = sum(umbral_1)/n_1;

v = n_1/n; % Censoring parameter

H_Temporal = umbral.*transpose(data.hs);
H_Temporal (H_Temporal == 0) = [];
T_Temporal = umbral.*transpose(data.tp);
T_Temporal (T_Temporal == 0) = [];

H_Temporal_1 = umbral_1.*transpose(data.hs);
H_Temporal_1 (H_Temporal_1 == 0) = [];
T_Temporal_1 = umbral_1.*transpose(data.tp);
T_Temporal_1 (T_Temporal_1 == 0) = [];

% Matrices de temporales y alturas máximas de cada temporal
Temporal = zeros(max(duraciones));

k = 0;

for i = 1:length(data.hs);
    if data.hs(i) >= H_ST

        if data.hs(i-1) < H_ST
            k = k+1;
            j = 0;
        end

        j = j+1;
        Temporal(j,k) = data.hs(i);
    end
end
```

```
Hmax = max(Temporal);

k = 0;

for i = 1:length(data.hs);
    if data.hs(i) >= H_1

        if data.hs(i-1) < H_1
            k = k+1;
            j = 0;
        end

        j = j+1;
        Temporal_1(j,k) = data.hs(i);
    end
end

Hmax_1 = max(Temporal_1);

% Periodos pico
Tp = data.tp;

Periodos = zeros(max(duraciones));

k = 0;

for i = 1:length(data.hs);
    if data.hs(i) >= H_ST

        if data.hs(i-1) < H_ST
            k = k+1;
            j = 0;
        end

        j = j+1;
        Periodos(j,k) = data.tp(i);
    end
end

Tmax = max(Periodos);

A = Periodos;
A (A == 0) = NaN;
Tmin = min(A);

k = 0;

for i = 1:length(data.hs);
    if data.hs(i) >= H_1

        if data.hs(i-1) < H_1
```

```
k = k+1;
j = 0;
end

j = j+1;
Periodos_1(j,k) = data.tp(i);
end
end

Tmax_1 = max(Periodos_1);

B = Periodos_1;
B (B == 0) = NaN;
Tmin_1 = min(B);

% Maximos anuales
for i = 1:T_ef
    Maximos_anuales(i) = max(data.hs(1+365*24*(i-1):365*24*i));
end

%% Longitud de onda
function [L_final] = Longitud_de_onda(T,h,Tolerancia)

g = 9.81;

i = 2;
L_indefinidas = g*T^2/(2*pi());
L(i-1) = L_indefinidas;
L(i) = L_indefinidas*tanh(2*pi()*h/L(i-1));

while abs(L(i)-L(i-1)) > Tolerancia
    i = i+1;
    L(i) = L_indefinidas*tanh(2*pi()*h/L(i-1));
end

L_final = L(length(L)-1);

end

%% Altura de rotura
function [Hb] = Altura_de_rotura(h,L,m)

Hb = 0.17*L*(1-exp(-1.5*pi()*h/L*(1+15*m^(4/3))));

end

%% EuroTop
function [Rc] = EuroTop(q_max,Hs_q,L,h_5m)

g = 9.81;

Profundidad_relativa = h_5m/Hs_q;
```

```

if Profundidad_relativa > 4;

    Rc = (-log(((q_max/10^3)/sqrt(g*Hs^3))/0.054))^(1/1.3)*Hs_q/2.12

else

    'Hay influencia del fondo marino'

end

end

%% Tanimoto
function [W,c,psi] = Tanimoto(Hi,h,L,Bm)

gamma_w = 1025*9.81;
gamma_s = 2650*9.81;
Sr = gamma_s/gamma_w;

c = (4*pi()*h/L)/sinh(4*pi()*h/L)*(sin(2*pi()*Bm/L))^2;
psi = min([0.03,(4.2*(1-c)/c^(1/3)*h/Hi+3.24*exp(-2.7*(1-c)^2/c^(1/3)*h/Hi))^(-3)]);

W = gamma_w*Sr/(Sr-1)^3*psi*Hi^3;

end

%% Cálculo de presiones
function [p1,p2,p3,p4,pu] = estabilidad(Hs,L,N_max,h_5m,hb,h_pie,h_paramento,d, Z_coronacion,Bm,beta)

% CALCULAR PARA OLA CUASI-ESTÁTICA (Hs_relativa = Hs* < 0.35) PARA IMPACTO
(Hs_relativa = Hs* > 0.35)
% Cuasi-estáticas con Sainflou y Impacto con Goda(extendido)

g = 9.81;
rho_w = 1025;

Hs_relativa = Hs/h_5m; % Hs_relativa = Hs*

Hi_Goda = min([1.8*Hs,hb]); % Hi en la formulación de Goda = H_1/250, se toma
como 1.8 Hs

Hrms = Hs/1.416;
Hmax_N = Hrms*sqrt(log(N_max));

% Coeficientes alfa

% Coeficientes de Goda
alfa_1 = 0.6+1/2*((4*pi()*h_pie)/L)/sinh(4*pi()*h_pie/L))^2;
alfa_2_Goda = min([(h_5m)-(d))/(3*(h_5m))*(Hi_Goda/(d))^2,2*(d)/Hi_Goda]); %

```

```
alfa_2
alfa_3 = 1-((h_paramento)/(h_pie))*(1-1/cosh(2*pi()* (h_pie)/L));

% Modificación (alfa* = alfa_mod = min{alfa_2,alfa_I})
% alfa_I = alfa_I0 * alfa_I1

if Hi_Goda/h_pie >= 0.4 || h_pie/h_paramento <0.45

    % alfa_I0
    if Hi_Goda <= 2*(h_pie)
        alfa_I0 = Hi_Goda/(h_pie);
    else
        alfa_I0 = 2;
    end

    % alfa_I1, se pidría sacar del ábaco
    delta_11 = 0.93*(Bm/L-0.12)+0.36*((h_pie-d)/h_pie-0.6);
    if delta_11 <= 0
        delta_1 = 20*delta_11;
    else
        delta_1 = 15*delta_11;
    end

    delta_22 = -0.36*(Bm/L-0.12)+0.93*((h_pie-d)/h_pie-0.6);
    if delta_22 <= 0
        delta_2 = 4.9*delta_22;
    else
        delta_2 = 3.0*delta_22;
    end

    if delta_2 <= 0
        alfa_I1 = cos(delta_2)/cosh(delta_1);
    else
        alfa_I1 = 1/(cosh(delta_1)*cosh(delta_2)^0.5);
    end

    % alfa_I
    alfa_I = alfa_I0 * alfa_I1;
    alfa_2_Takahashi = max([alfa_2_Goda,alfa_I]); % alfa_mod = alfa*

% Presiones [Pa] Máxima cota de agua

if Hs/h_pie < 0.3
    lambda_1 = 1.0;
elseif Hs/h_pie < 0.6
    lambda_1 = 1.2-2/3*(Hs/h_pie);
else
    lambda_1 = 0.8;
end

lambda_2 = 0;
```

```

        lambda_3 = lambda_1;
        alfa_2 = alfa_2_Takahashi
    else

        lambda_1 = 1;
        lambda_2 = 1;
        lambda_3 = 1;
        alfa_2 = alfa_2_Goda; % porque no entra en Takahashi

    end

    nu = 0.75*(1+cos(beta))*lambda_1*Hi_Goda;

    % Presiones [N/m]
    p1 = 1/2*(1+cos(beta))*(lambda_1*alfa_1+lambda_2*alfa_2*cos(beta)^2) *
    *rho_w*g*Hi_Goda;

    p2 = p1/cosh(2*pi()*h_pie/L);

    p3 = alfa_3*p1;

    p4 = p1/nu*(Z_coronacion);

    pu = 1/2*(1+cos(beta))*alfa_1*alfa_3*lambda_3*rho_w*g*Hi_Goda;

    % Aviso del método de cálculo
    if Hi_Goda/h_pie >= 0.4 || h_pie/h_paramento < 0.45
        'Calculado por Takahashi (1994)'
    elseif h_pie/h_paramento > 0.45 && h_pie/h_paramento <= 0.75
        'Calculado por Takahashi (1994), pero se han de confirmar las condiciones de
    de rotura por banqueta'
    else
        'Calculado por Goda (1985)'
    end

end

%% Lector IH2VOF
function [Xsorted,Ysorted,Vvertical,tVvertical] = leerIH2VOF(direccion,nivel_mar)
% Dirección de carpeta escrita entre ''
% Nivel del mar en metros

    cd (direccion)

    archivos = ls;

    for i = 3:length(archivos(:,1))
        nombresDEarchivos(i-2)=convertCharsToStrings(archivos(i,:));
    end

    for j = 1:length(nombresDEarchivos)

```

```
%LECTURA DE SUPERFICIE LIBRE
cd (strcat(direccion, '\', nombresDEarchivos(j), '\Sensor_freeSurface'))

load heig1
t1 = heig1(600:900,1);
h1 = heig1(600:900,2)-nivel_mar;

load heig2
t2 = heig2(:,1);
h2 = heig2(:,2)-nivel_mar;

coef_amplificacion(j) = max(h2(size(t2,1)*2/3:size(t2,1)))-min(h2(size(t2,1)*2/3:size(t2,1))); % Cogiendo el registro del último tercio, que etsá estabilizado

%LECTURA DE PERIODO DE OLEAJE
cd (strcat(direccion, '\', nombresDEarchivos(j)))
load info_ext.in

periodo(j) = info_ext(4);

%LECTURA DE velocidad vertical
cd (strcat(direccion, '\', nombresDEarchivos(j), '\Sensor_vVertical'))
load xv2

Tfin = size(xv2,1);
Vfin = size(xv2(1,:),2) - 1; % Tamaño de la amtriz en el eje de velocidades, excluyendo la columna de T

for k = 1:Tfin
    Vvertical(j,k) = max(xv2(k,2:Vfin), [], 2, 'ComparisonMethod', 'abs');
    VverticalMIN(j,k) = min(xv2(k,2:Vfin), [], 2);
    VverticalMAX(j,k) = max(xv2(k,2:Vfin), [], 2);
    tVvertical(j,k) = xv2(k,1);
end

cd (direccion)
end

T = periodo;
Coef = coef_amplificacion;

[Tsorted,I] = sort(T);
Coefsorted = Coef(I);

end
```