



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**



TRABAJO FIN DE GRADO: AMPLIACIÓN FUNCIONAL Y ENERGÉTICA DEL PUERTO DE MOTRIL



Autor: Alejandro Ariza López

Tutor: Antonio Moñino Ferrando

Co-tutor: Rafael Bergillos Meca

Curso académico 2017-2018

CONTENIDO

Contenido	3
Índice de figuras y tablas	5
Resumen	9
Abstract.....	10
1- Introducción y objetivos.....	12
2- Problemática a abordar.....	15
2.1 Historia y actualidad de la energía marina.....	15
2.2 El recurso undimotriz, su producción y formas de aprovechamiento....	17
2.3 Los estados de mar y su energía.....	20
2.4 Mecanismos de aprovechamiento del oleaje	20
2.4.1 Turbina Wells.....	21
2.4.2 Turbina de impulso	23
2.5 Sistemas de columna de agua oscilante (OWC).....	25
2.5.1 Tipologías de OWC.....	26
2.5.2 Prototipos existentes.....	27
3- Cuerpo del informe	37
3.1 Emplazamiento de la obra.....	37
3.2 Índices de repercusión de la obra.....	38
3.2.1 Carácter general. Índices IRE e ISA.....	38
3.2.2 Carácter operativo. Índices IREO e ISAO	42
3.3 Valores recomendados de la obra: Vida útil, probabilidades de fallo y operatividad	46
3.4 Elección tipo de dique	48
3.4.1 Criterios económicos.....	48
3.4.2 Criterios técnicos.....	50
3.4.3 Criterios ambientales	50

3.4.4	Conclusión y elección	51
3.5	Procedimiento constructivo	51
3.6	Caracterización del clima marítimo	62
3.6.1	Viento	62
3.6.2	Oleaje	65
3.6.3	Régimen extremal.....	66
3.7	Cálculo del dique	70
3.7.1	Altura de ola máxima y propagación	70
3.7.2	Parámetros de diseño del dique	72
4-	Conclusiones	83
5-	Referencias	86

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Esquema de funcionamiento del Pato Salter – ‘Anglia Campus’	15
Figura 2. Convertidor de energía de olas Pelamis, en Portugal – ‘Wikimedia Commons’	16
Figura 3. Mapa que representa la energía undimotriz media anual, en kW/m - 'Joao Cruz'	19
Figura 4. Ejemplo de turbina Wells – ‘Research Gate’	21
Figura 5. Esquema de funcionamiento de turbina Wells – ‘OceanWaveEnergy Weebly’	23
Figura 6. Ejemplo de una turbina de impulso -'Made In China'	24
Figura 7. Ejemplo de una turbina de impulso - 'ECVV'	24
Figura 8. Esquema de funcionamiento de un OWC básico - 'Agencia SINC'	25
Figura 9. Esquema del dispositivo OWC de Bochaux-Pracelque - 'Paul A. Lynn'.....	27
Figura 10. Boceto del dispositivo OWC Nel - 'Research Gate'	28
Figura 11. Dispositivo buque Kaimei en alta mar - 'Research Gate'	29
Figura 12. Esquema con el funcionamiento de la planta de Kvaerner – ‘Fernández Díez’	29
Figura 13. Fotografía del convertidor de energía del puerto de Sakata - 'Research Gate'	30
Figura 14. Fotografía del dispositivo OWC de Vizhinjam - 'Madhyamam'	31
Figura 15. Fotografía del dispositivo OWC de Osprey - 'Tesisat'	31
Figura 16. Esquema de funcionamiento del dispositivo OWC de Sabón – ‘Fernández Díez’	32
Figura 17. Fotografías del elemento OWC de la isla de Pico - 'Research Gate'	33
Figura 18. Esquema de funcionamiento del dispositivo Limpet 500 - 'ESRU Strath'	33
Figura 19. Esquema de funcionamiento del dispositivo OWC Energetech - 'New Atlas'	34
Figura 20. Fotografía del Ocean Energy Buoy, en Irlanda - 'Ocean Energy'	35

Figura 21. Localización del puerto de Motril en Andalucía - 'AP Motril'	37
Figura 22. Vista aérea de la zona portuaria de Motril - 'Google Maps'	38
Figura 23. Piezas de hormigón en forma de dolo para diques en talud – 'Universidad Politécnica de Valencia'	48
Figura 24. Maniobra de fondeo de los cajones de un dique vertical – 'DOVICAIM'	49
Figura 25. Imagen virtual del dique undimotriz de Mutricu – 'La Información'	52
Figura 26. Plano del puerto de Motril, destacando el dique a ampliar – 'AP Motril'	52
Figura 27. Esquema representando los elementos más destacados de un dique en talud – 'ACB Puertos'	53
Figura 28. Proceso de dragado mediante una draga-gánguil – 'Drag-Sur' 54	
Figura 29. Gánguil de apertura por fondo, convertible a draga mediante grúa-celosía – 'Cyes Maritime Works'	55
Figura 30. Proceso de ejecución de los mantos desde el propio dique mediante grúa – 'Grúas Aguado'	56
Figura 31. Proceso de ejecución del encofrado de la losa – 'Pipo Agu'	57
Figura 32. Equipo de buzos ejecutando la correcta colocación de los redondos de acero – 'Caminos País Vasco'	58
Figura 33. Colocación de las piezas prefabricadas mediante el uso de grúa – 'La Información'	59
Figura 34. Finalización de la plataforma de unión de las celdas con el dique – 'Caminos Euskadi'	60
Figura 35. Tapado de las celdas con losas prefabricadas – 'Caminos País Vasco'	60
Figura 36. Ejecución del manto de la región de sotamar – 'Caminos País Vasco'	61
Figura 37. Fotografía aérea de la central de Mutricu finalizada, inspiración para la posible central de Motril – 'Ente Vasco de la Energía'	61
Figura 38. Representación de la velocidad del viento en m/s para cada dato de tiempo registrado.....	62
Figura 39. Histograma de la frecuencia de los distintos valores de velocidad del viento en m/s	63
Figura 40. Histograma de la frecuencia de las distintas direcciones de procedencia del viento, siendo el valor 0 el norte, avance horario	63

Figura 41. Rosa de los vientos que agrupa todos los datos de viento simulados.....	64
Figura 42. Representación de los valores de altura de ola significativa en metros para cada valor de tiempo registrado, tras el filtrado de datos ($H < 7m$)	65
Figura 43. Histograma de la frecuencia de las distintas direcciones de procedencia del oleaje posibles, siendo el valor 0 el norte, avance horario	66
Figura 44. Densidad bivariada, figura que representa la altura de ola significativa frente a su período de pico asociado.....	66
Figura 45. Representación de los valores máximos de altura de ola significativa de cada año registrado (2019-2043).....	67
Figura 46. Función de densidad ajustada mediante la generalizada de valores extremos.....	68
Figura 47. Función de distribución ajustada mediante la generalizada de valores extremos.....	68
Figura 48. Ilustración 36. Esquema con los valores relevantes del dique y sus distintos elementos.....	81
Tabla 1. Valores de los índices de repercusión de la obra.....	45
Tabla 2. Valores de la vida útil del proyecto en función del IRE.....	46
Tabla 3. Valores de la probabilidad conjunta de fallo en función del ISA..	46
Tabla 4. Valores de la probabilidad de parada operativa en función del ISA	46
Tabla 5. Valores de la operatividad en función del IREO.....	47
Tabla 6. Valores del número de paradas operativas en función del ISAO .	47
Tabla 7. Valores recomendados de la obra.....	47
Tabla 8. Criterios económicos para la elección del tipo de dique	49
Tabla 9. Criterios técnicos para la elección del tipo de dique	50
Tabla 10. Criterios ambientales para la elección del tipo de dique.....	51
Tabla 11. Valores máximos registrados de altura de ola máxima	67
Tabla 12. Valores del nº de onda iterados	71
Tabla 13. Parámetros de importancia para el cálculo del dique	73
Tabla 14. Parámetros geométricos del dique	77

RESUMEN

En los últimos años, los problemas relacionados con el gasto energético y el agotamiento de los recursos del planeta se han visto agravados en gran medida. Por culpa del uso de las energías combustibles, las emisiones de CO₂ a la atmósfera siguen aumentando, el nivel del mar crece y climas anormales se desarrollan en gran parte del globo. Es en los países más desarrollados donde las personas debemos ser conscientes de la idea de que el ser humano no está haciendo las cosas correctamente, y donde se tiene que empezar a invertir en proyectos y soluciones sostenibles que nos aseguren el bienestar a nosotros, a las futuras generaciones e incluso al resto de especies que habitan el mundo.

Es por esto que el objetivo principal de este trabajo de Fin de Grado es materializar una de estas soluciones respetuosas con el medio ambiente, creando una nueva alineación para el dique principal del puerto de Motril, de manera que, por sí sola permita la gestión autónoma del consumo energético del puerto gracias a una tecnología que aprovechará la energía de las olas.

En primer lugar, se hará un análisis de la energía undimotriz, pasando por sus orígenes y antecedentes, comentando a los personajes más brillantes en este campo, así como los lugares en los que ya se usan estas técnicas. Se hablará de la disponibilidad del recurso, su base teórica y los métodos y maquinarias más comunes para su aprovechamiento.

Seguidamente se estudiará la zona de la construcción del proyecto, el clima marítimo presente en la costa motrileña, los índices de repercusión que tendrá la nueva ampliación y los parámetros más importantes para el dimensionamiento.

Por último, se explicarán las fases constructivas, así como las distintas embarcaciones utilizadas, finalizando con el cálculo estimado del dique y una serie de conclusiones.

ABSTRACT

In the recent years, the problems related to energy expenditure and depletion of the planet's resources have been greatly aggravated. Because of the use of combustible energies, CO₂ emissions into the atmosphere continue to rise, sea levels rise and abnormal climates develop in much of the globe. It is in the most developed countries where people must be aware of the idea that human beings are not doing things correctly, and where they have to start investing in sustainable projects and solutions that ensure our well-being, future generations and even the rest of the species that inhabit the world.

That is why the main objective of this End of Degree Project is to materialize one of these solutions respectful with the environment, creating a new alignment for the main dam of the port of Motril, so that, by itself, allow autonomous management of the port's energy consumption thanks to a technology that will use the energy of the waves.

First, an analysis of wave energy will be made, going through its origins and background, commenting on the brightest characters in this field, as well as the places where these techniques are already used. We will talk about the availability of the resource, its theoretical basis and the most common methods and machinery for its use.

Then we will study the construction area of the project, the maritime climate present on the Motril coast, the repercussion rates that the new expansion will have and the most important parameters for sizing.

Finally, the construction phases will be explained, as well as the different boats used, ending with the estimated calculation of the dike and a series of conclusions.



1- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La realización de este trabajo tiene principalmente tres puntos de inspiración.

Por un lado, el uso de un tipo de energía renovable menos común o con un menor interés social como es la energía de las olas. Vivimos en un mundo de continuo y desmedido consumismo, lo cual a la larga nos llevará a una situación crítica en cuanto a recursos se refiere. El propio planeta nos demuestra con el paso de los meses que nuestras acciones están teniendo repercusión en su ciclo de vida natural. Es por esto que a nivel técnico debemos de buscar las mejores soluciones alternativas a la quema de combustibles en centros de gasto energético constante, como puede ser un puerto, en el que se produce un intercambio modal de transporte, desde el punto de vista comercial y humano a diario.

Otra idea sobre la que pivota este trabajo, es la de la autosuficiencia del puerto de Motril a través de la energía conseguida con los sistemas de captación del oleaje. Lo ideal es que todo el consumo energético producido en el puerto se solvente con lo producido en la nueva estructura, y existen pruebas y datos que nos confirman que esto es posible.

El último punto, no menos importante, sería el del impulso del puerto de Motril, la ciudad en sí y de la propia Granada. El puerto granadino es de 1^º generación, lo cual quiere decir que tiene una función de abrigo e intercambio, con las mercancías desagrupado, por lo que es el tipo más básico de puerto. El hecho de implementar algún sistema de captación de energía undimotriz puede dotar al puerto de una mayor eficiencia, lo que daría lugar a un mayor volumen de transferencia de mercancías, mayor interés por parte de distribuidores y grandes multinacionales, lo que, con una buena conexión con la capital granadina, puede aportar un valor añadido. Además, Granada tiene un potencial turístico enorme, el cual puede ser explotado aún más mediante una buena comunicación con la



zona costera y con el aumento de la llegada de cruceros al puerto. Todo esto se puede alcanzar mediante una mejora de la infraestructura portuaria y una renovación en cuanto a técnica y sistemas se refiere.

2- PROBLEMÁTICA A ABORDAR

2.1 Historia y actualidad de la energía marina

La energía de las olas se encuentra en una etapa crítica en cuanto a su aprovechamiento después de 3 décadas de intensa investigación y desarrollo. Los primeros prototipos a escala real han sido testeados en el mar, así como los primeros pedidos comerciales han sido encargados. Las primeras “granjas de olas” en el litoral están siendo construidas. Este tipo de proyectos proporcionarán en cierta medida una producción similar a los de la explotación del viento, permitiendo una alternativa cuando intentamos superar el reto tecnológico de encontrar fuentes de energía renovables, cumpliendo además uno de los más antiguos deseos de la civilización: controlar y utilizar el poder del océano.

La primera patente procede del año 1799, pero la investigación sobre el recurso se ha intensificado durante la década de los 70, particularmente en el Reino Unido, aunque no sería justo olvidar los avances llevados a cabo en Japón, donde en los 60, la marina japonesa construyó boyas señalizadoras que usaban las ondas para abastecer su luz.

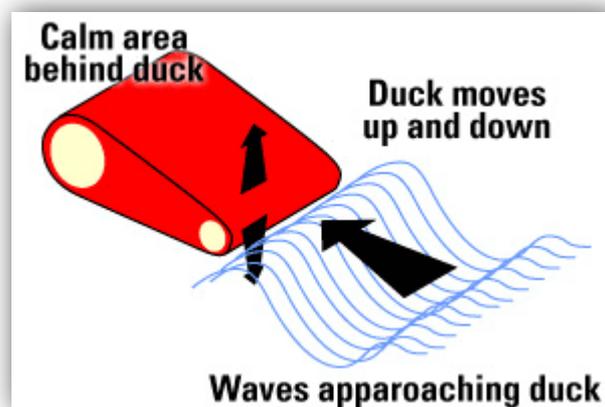


Figura 1. Esquema de funcionamiento del Pato Salter – ‘Anglia Campus’

El punto de inflexión que estimuló el comienzo de investigaciones en más países fue la publicación de un artículo por parte del profesor Stephen Salter, de la Universidad de Edimburgo, en la mundialmente conocida revista Nature. Sus palabras eran una respuesta directa a la crisis del petróleo de los setenta, siendo su conclusión que la atracción a la energía de las olas debía ser inmediata. Su concepto era un cuerpo flotante con forma de leva, conocido como el Salter duck (Pato Salter) aún hoy reconocido como uno de los dispositivos más eficientes a la hora de absorber la potencia de las olas.

La pregunta que nos hacemos es por qué la potencia de las olas no despegó como forma de energía a partir de estos avances. En la época de los ochenta, el gobierno del Reino Unido tomó la valiente decisión de destinar todos los fondos a la construcción de sistemas de generación en el rango de 2GW, la capacidad de una gran estación nuclear con funcionamiento mediante carbón. *João Cruz, 2008*

Muchos científicos pensaron que no fue la decisión correcta, y que sería mejor pensar en desplegar unidades más pequeñas de generación, de pocos MW.



Figura 2. Convertidor de energía de olas Pelamis, en Portugal – ‘Wikimedia Commons’

La experiencia sugiere que estaban en lo cierto. Los precursores de las energías alternativas sostenían que la política del gobierno estaba diseñada para parar las investigaciones sobre la energía del oleaje y justificar su ruta hacia la energía nuclear.

A mitad de los noventa, se han producido logros destacables en el desarrollo de sistemas de energía undimotriz en el litoral, con varios prototipos a escala real siendo probados e incluso conectados a redes nacionales. Al igual que con la energía eólica hace 15 años, estamos en una situación en la que hay varios competidores, pero no está claro cual dará el salto final hacia las aplicaciones comerciales. Algunos diseños pre comerciales están siendo financiados por gobiernos nacionales, concretamente en Portugal y el Reino Unido, con algunos centros de pruebas construidos o planeados. Esta voluntad política es crucial para asegurar el desarrollo de esta industria.

2.2 El recurso undimotriz, su producción y formas de aprovechamiento

Al pensar en fuentes de energía renovables, las primeras que vienen a nuestras mentes son el viento, el sol o el agua. Para enfrentarnos al cambio climático y a los retos impuestos por la necesidad de encontrar energía fiable, tenemos un recurso que no se ha explotado realmente hasta ahora, la energía de las olas. Su potencial ha sido siempre muy reconocido, y generalmente asociada con una naturaleza destructiva.

Este tipo de energía es una forma concentrada de la energía solar. El sol produce diferencias de temperatura a lo largo del planeta, formándose así vientos que soplan sobre la superficie del océano. Esto produce pequeñas ondas que acaban transformándose en el oleaje. Estas olas pueden viajar miles de kilómetros sin pérdida de energía. La potencia que proporcionan es mucho mayor que la que puede producir el viento o el sol como formas

de energía. Cuando las olas alcanzan aguas poco profundas (cuando la profundidad es menor que media longitud de onda), estas se deceleran, la longitud de onda disminuye y crece la altura, lo que lleva a la rotura. Las pérdidas de energía pueden producirse mediante la rotura y mediante la fricción con el fondo marino, por lo que solo una fracción del recurso llega a la costa. Una onda transporta tanto energía potencial gravitatoria como energía cinética. El total de la energía por lo tanto es proporcional a dos factores: la altura al cuadrado y el período, midiéndose en vatios por metro de frente de olas incidente. Para hacernos una idea, la costa oeste de Europa recibe del océano de media 50Kw de potencia por metro de frente. En general, el recurso es del orden de la magnitud del consumo eléctrico de todo el mundo. En un día normal, a la costa de las Islas Británicas llega 1TWh, lo que corresponde aproximadamente al consumo medio diario de electricidad en el Reino Unido, siendo esta la misma cantidad de energía que se liberó en el tsunami que asoló la costa india en 2004. Estos datos nos sirven para ponernos en la perspectiva de la clase de demanda que los humanos necesitan de los recursos naturales, y para darnos cuenta de la urgente necesidad de encontrar soluciones sostenibles. *João Cruz, 2008*

El recurso de esta energía en todo el globo es del orden del consumo de electricidad mundial, unos 2TW. Como ya sabemos, podemos aprovechar hasta un 25%, siendo una contribución significativa, pero no el mayor descubrimiento de la historia. Su ventaja es que la energía mecánica oscilante tiene una gran calidad, y puede viajar grandes distancias sin excesivas pérdidas. Además, esta energía es capaz de absorberse en un punto desde cualquier dirección, lo que es muy beneficioso para pequeños dispositivos, con capacidades en torno a 1MW.

Este recurso es creado por el viento, como producto de la redistribución de la energía solar en la atmósfera. La tasa de energía entrante de las olas va normalmente de 0.01 a 0.1W/m², una pequeña fracción de la energía

solar, cuya media es 350 W/m², pero las olas pueden desarrollarse durante sus largos viajes, llegando a alcanzar una media de 100KW/m. Debido a este origen, los mayores niveles de energía se encuentran en el lado de sotavento de las zonas templadas de los océanos.

Es crucial estimar el recurso para seleccionar lugares adecuados para proyectos y desarrollos. Se tienen datos de los parámetros del viento y las olas gracias a unos 10.000 puntos de medida lejos de la costa durante 10 años. Con estos datos se han confeccionado diferentes mapas. Uno de ellos es el que representa la media anual del poder de las olas para todos los puntos de la base de datos mundial, durante 10 años. Se aprecia que las zonas con más energía están en la zona entre media y alta latitud, particularmente entre 40 y 60 grados. Hay que tener en cuenta que el recurso global tiene una gran variación estacional, por lo que es conveniente evaluar el ratio entre la energía mínima mensual y la energía anual.

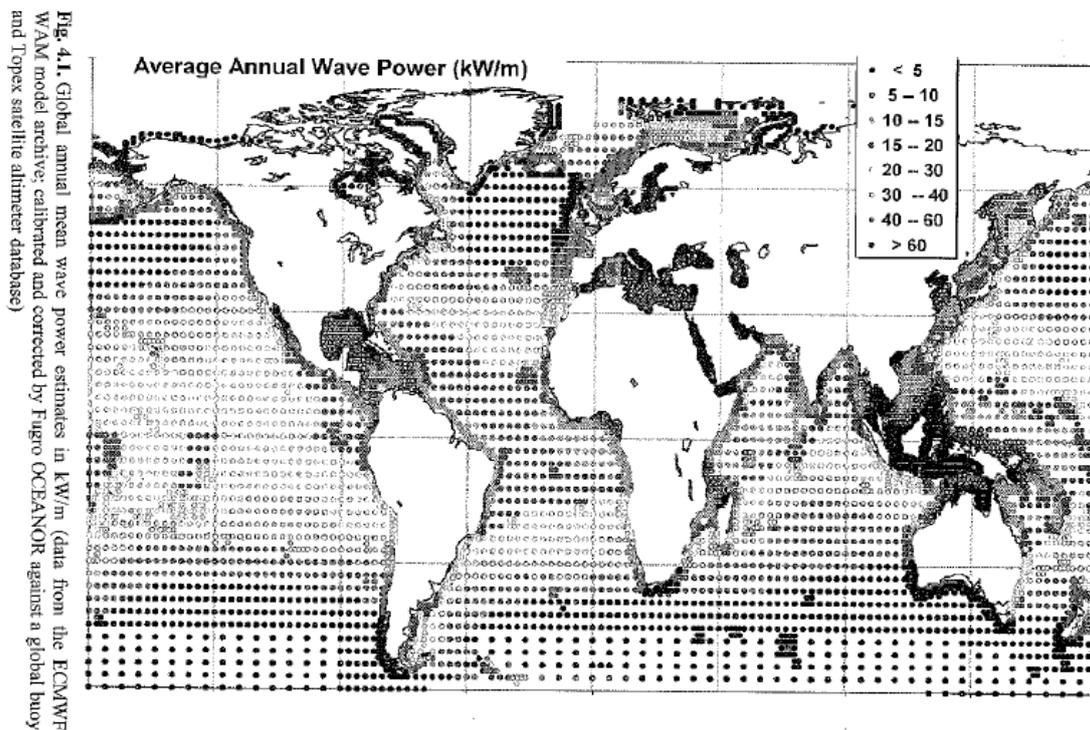


Figura 3. Mapa que representa la energía undimotriz media anual, en kW/m - 'Joao Cruz'

El reto es elegir una localización que proporcione un recurso adecuado y

todas las condiciones necesarias para asegurar el aprovechamiento de la energía de las olas. Una de las claves es la proximidad a la costa, ligada a la profundidad, ya que esto influirá en el coste o la reparación segura de los dispositivos.

2.3 Los estados de mar y su energía

Las olas existentes en la superficie en alta mar son oscilaciones de esta capa somera, compuestas por la superposición lineal de un gran número de componentes más simples. Este componente más básico tiene carácter sinusoidal, con período T , viajando a su velocidad de fase, $U=Gt/2\pi$. De hecho, las partículas del agua no viajan, sino que oscilan en círculos.

La energía de este tren de ondas es $E=\rho g H^2$. Estas oscilaciones mueven energía en la dirección del tren. El poder de las olas en un estado de mar general es la integral de la densidad de energía multiplicada por la velocidad de grupo.

Para caracterizar un estado de mar, se usan una serie de parámetros, siendo su representación más común la elevación frente al tiempo. Los valores extremos individuales pueden ser fácilmente extraídos, como la altura de ola máxima o el periodo máximo.

La altura de ola significativa, H_s es una medida estándar en la industria, $H_{1/3}$ por definición (la media del tercio de las olas mayores).

Nosotros estimaremos nuestro estado de mar con los datos del punto SIMAR correspondiente.

2.4 Mecanismos de aprovechamiento del oleaje

Una de las tecnologías más utilizadas para transformar el oleaje en electricidad o energía mecánica es la turbina de aire diseñada para

columna de agua oscilante (OWC a partir de ahora). A su vez, dentro de las turbinas existen dos modelos predominantes, la turbina Wells, cuyo nombre se debe a su inventor, Alan Arthur Wells, en 1976, y la turbina de Impulso.

2.4.1 Turbina Wells

La turbina Wells se trata de una turbina bidireccional constituida por una serie de perfiles aerodinámicos simétricos colocados de manera perpendicular a la dirección del flujo. Teniendo en cuenta una velocidad de rotación dada, existe una relación lineal entre la caída de presión y la velocidad del flujo, siendo este el principio esencial para la correcta elección de la turbina según la columna de agua oscilante presente.



Figura 4. Ejemplo de turbina Wells – ‘Research Gate’

Con el paso de los años, el desarrollo de la turbina Wells se enfocó por el camino de las variables geométricas, el perfil de las hojas de la turbina y el número de planos rotores. El avance más reciente consta de una turbina con un único plano de hojas y un biplano rotor. Las plantas a gran escala han ido utilizando configuraciones de turbinas más avanzadas, incluyendo monoplanos básicos y turbinas biplano con simetría estándar en sus hojas (NACA).

Se puede decir que este tipo de turbina, ingeniada para su uso en plantas de energía marina de Columna de Agua Oscilante, en las que una superficie de agua crece y decrece dentro de una cámara de aire comprimido, es probablemente de las que más se usan hoy en día en las centrales que funcionan con este tipo de máquinas, siendo además ideal para un flujo bidireccional, gracias a sus álabes simétricos. Estos provocan un par de fuerzas en la misma dirección, además de una fuerza axial que fluctúa. No se necesita un sistema de rectificación que dificulte el mantenimiento de la instalación, gracias al único sentido del par.

Al hablar de turbinas Wells, es interesante comentar los ángulos de ataque con los que actúa el flujo sobre ella, existiendo lugares en los que se usan este tipo de turbinas en los que se incorpora un dispositivo que puede cambiar el ángulo de incidencia dependiendo del flujo, lo que hace el proceso mucho más eficiente. Existen turbinas Wells de doble rotor girando ambos en la misma dirección o en direcciones opuestas.

Una variable a tener en cuenta en el estudio de las turbinas Wells es la solidez. Se trata de una medida del bloque del flujo de aire dentro de la turbina, así como de la interferencia que se produce entre las cuchillas de la turbina. Normalmente, a valores pequeños de solidez, el efecto de esta es pequeña, pero empieza a ser importante cuando supera el valor de 0.5, produciendo la disminución de la eficiencia

Para una turbina Wells con una solidez moderada, el efecto de esta en los coeficientes aerodinámicos es pequeño, de modo que, para un rotor con una cuerda constante, la caída de presión es también constante con el radio. Este puede no ser el caso para un rotor con una solidez mayor o en el que la cuerda varía con el radio.

Como desventajas principales de la turbina Wells encontramos un rendimiento algo bajo, ya que conforme la velocidad del flujo aumenta, también lo hace el ángulo de ataque, provocando que en cierto punto el momento generado sobre el rotor decrezca de forma brusca. Para evitar esto es recomendable el uso de los dispositivos reguladores del ángulo de incidencia. El siguiente punto en su contra es la fluctuación de la fuerza ya comentada, la cual provoca fatiga en la pieza, originando inconvenientes en la vida útil de la turbina. *Raghunathan, 1995*

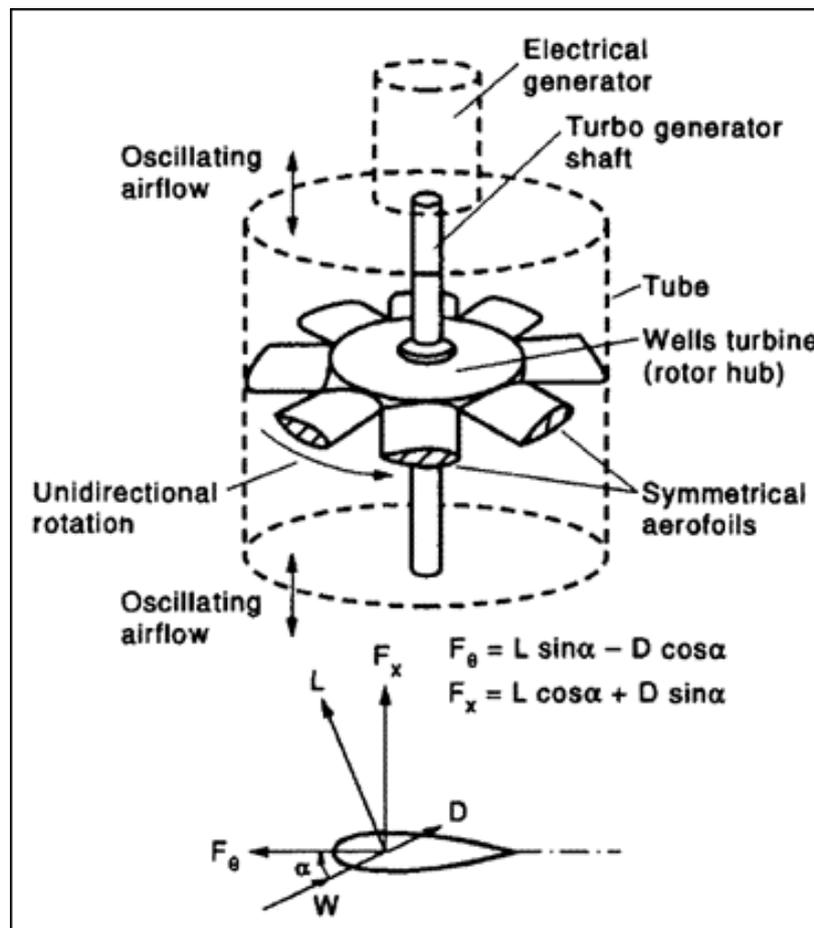


Figura 5. Esquema de funcionamiento de turbina Wells – ‘OceanWaveEnergy Weebly’

2.4.2 Turbina de impulso

Las turbinas de impulso son las más viejas formas de máquinas hidráulicas usadas para transformar energía hidráulica en trabajo mecánico. Éstas son también las máquinas hidráulicas más simples en términos de diseño, mantenimiento y control. Se utilizan generalmente en las centrales hidroeléctricas. Siendo una máquina específica para velocidades bajas, sus diseños no necesitan ser muy complicados.

La velocidad específica se puede, sin embargo, aumentar con inyectores adicionales cuando sea necesario. Por otra parte, puesto que estas

máquinas funcionan bajo presión atmosférica, no hay necesidad de que en los diseños se tenga en cuenta el sellado de la turbina.



Figura 6. Ejemplo de una turbina de impulso -'Made In China'

Incluso el riesgo de la cavitación en estos sistemas es mucho más limitado con respecto al otro tipo de turbinas. Debido a esto, las turbinas de impulso se han convertido en las máquinas hidráulicas más extendidas para generar potencia micro-hidráulica en todo el mundo.

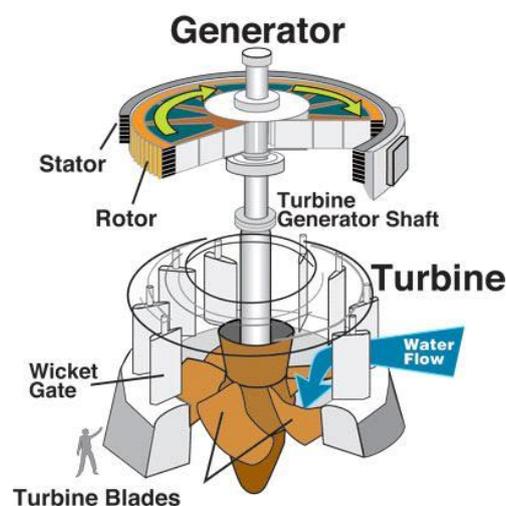


Figura 7. Ejemplo de una turbina de impulso - 'ECVV'

2.5 Sistemas de columna de agua oscilante OWC

Esta tecnología está fundamentada en una estructura de cámaras sumergidas y abiertas al mar bajo la superficie libre del agua, quedando de esta forma cierto volumen de aire en la parte interior. La comunicación con el exterior se produce a través de una turbina. De esta forma, el oleaje que llega a las cámaras provoca en la lámina de agua interior un movimiento oscilante de ascenso y descenso, por lo que el aire confinado se comprime y se descomprime, lo que origina el movimiento de la turbina que estará conectada a un generador eléctrico. En este tipo de sistemas suelen utilizarse las comentadas anteriormente turbinas Wells, ya que es posible su accionamiento mediante un flujo de aire bidireccional, sin que cambie el sentido del giro.

Las partes móviles en estos dispositivos OWC son únicamente el conjunto de la turbina, alternador y las válvulas de control del flujo de aire, que tienen función protectora del generador.

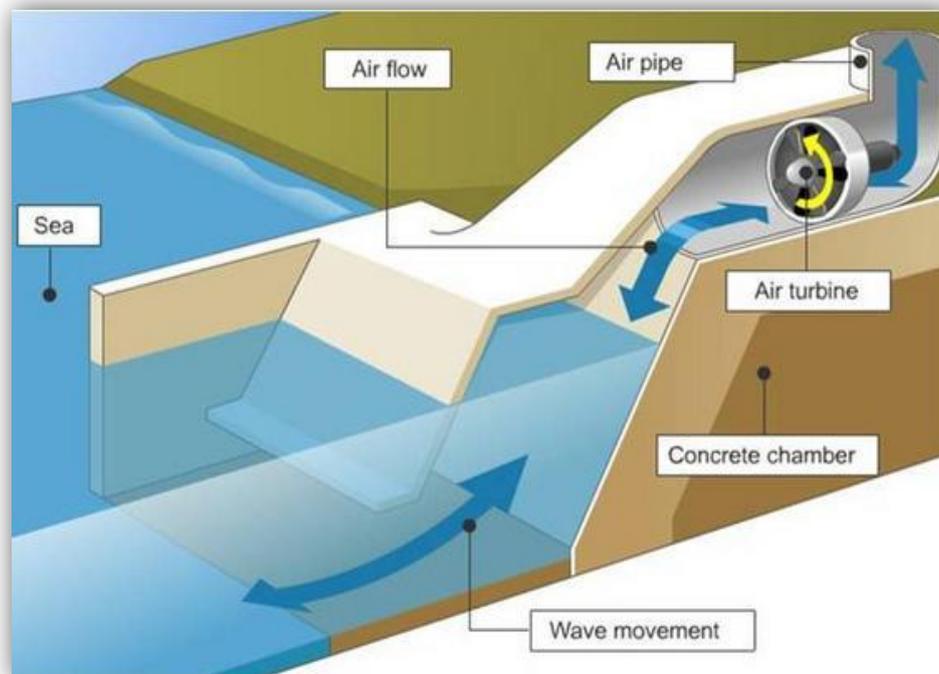


Figura 8. Esquema de funcionamiento de un OWC básico - 'Agencia SINC'

La gran ventaja de los dispositivos OWC frente a otros sistemas convertidores de energía (WEC), es que las partes móviles son escasas y, además, se encuentran emergidas, por lo que el mantenimiento y las reparaciones serán mucho más sencillas y económicas.

2.5.1 Tipologías de OWC

Existen diversidad de criterios a la hora de clasificar estos dispositivos. En este estudio se indicarán los 2 factores determinantes más relevantes. Desde el punto de vista de las **dimensiones** que tiene el dispositivo frente a la longitud de onda incidente, clasificaremos el OWC en:

- Sistema Puntual: En este caso, la longitud de la onda incidente es mayor que las dimensiones propias del dispositivo, el cual actúa como una antena de oleaje, pues el frente de olas tiende a converger a estos puntos aislados.
- Sistemas atenuadores: La longitud de onda incidente es menor o igual que las dimensiones del dispositivo, de manera que este es colocado paralelamente al frente de olas.
- Sistemas terminadores: Al igual que los sistemas atenuadores, estos tienen unas dimensiones mayores que la longitud de onda que incide sobre ellos, pero se intentan colocar perpendicularmente al frente de olas.

La otra clasificación se basa en la forma de resistir las acciones:

- Sistemas fijos: Esta tipología tiene un diseño muy dependiente del emplazamiento del proyecto. Suelen estar apoyados sobre el fondo marino por gravedad, o incluso anclados en la línea de la costa,

principalmente en acantilados. Quedan expuestos al frente del oleaje, recibiendo mucha energía. El inconveniente es que se sitúan en profundidades reducidas, lo que provoca unas condiciones de operatividad más difíciles.

- **Sistemas flotantes:** A diferencia de los sistemas fijos, los flotantes pueden situarse en zonas de offshore, con profundidades de hasta 40m, siendo su mayor ventaja el disponer de regímenes de oleaje más energéticos.

2.5.2 Prototipos existentes

Existen sistemas OWC en distintas partes del mundo desde incluso principios del siglo XX. En este apartado se mostrarán algunos de los más importantes, en funcionamiento hoy en día o destruidos anteriormente por la acción del oleaje. *Pedro Fernández Díez*

- **OWC de Bochaux-Pracelque:**

Se puede decir que es uno de los dispositivos OWC conocido más antiguos, pues fue diseñado en 1910 por Bochaux-Pracelque.

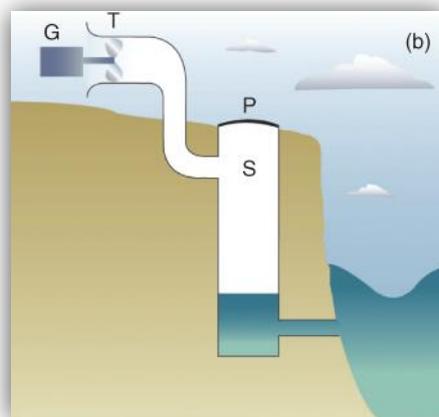


Figura 9. Esquema del dispositivo OWC de Bochaux-Pracelque - 'Paul A. Lynn'

Estaba situado en una casa francesa, en Burdeos, de manera que se ideó para suministrar de energía a dicha vivienda, mediante una cámara vertical (S) en el interior de un dique vertical, con una turbina (T) conectada a un generador (G) llegando a proporcionar una potencia de hasta 1kW.

- **Dispositivo Nel:**

Este sistema es de una escala pequeña, datando de 1976. Su nombre se debe al lugar donde se desarrolló, el Instituto Nacional de Ingeniería (*National Engineering Laboratory*). Su funcionamiento era posible gracias a una serie de turbinas tipo Francis, produciendo una potencia de 2GW. El aire circulaba en un único sentido mediante una turbina auto-rectificadora que no tiene necesidad de válvulas.

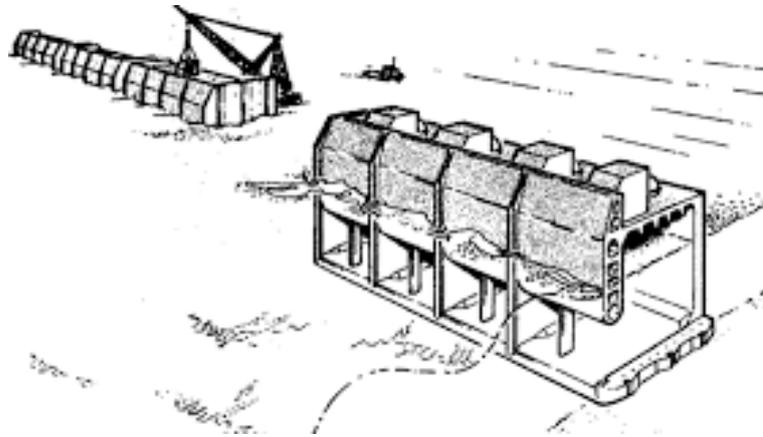


Figura 10. Boceto del dispositivo OWC Nel - 'Research Gate'

- **Dispositivo atenuador Kaimei:**

Se trata de un elemento flotante ideado por el Centro Japonés de Tecnología y Ciencia Marina, con Yoshio Masuda como el principal impulsor del sistema.

En su esencia, se trata de un barco de 80m de eslora en cuyo interior tiene 10 cámaras que actúan como OWC, lo que se traduce

en 2 MW de potencia instalada, aunque posteriormente se estimó que la producción de energía era menor de la deseada.

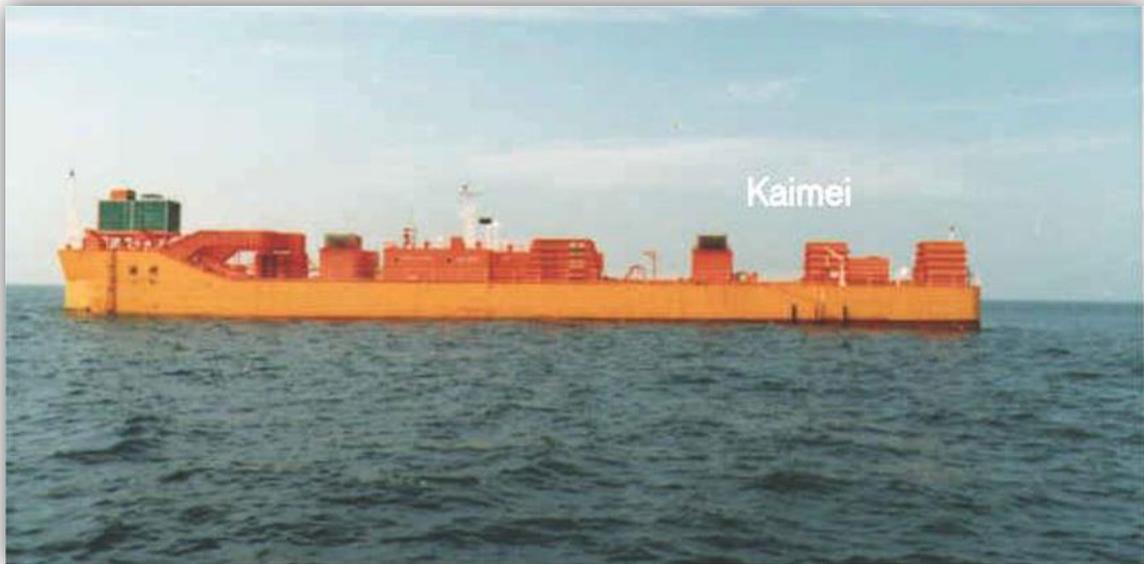


Figura 11. Dispositivo buque Kaimei en alta mar - 'Research Gate'

- **Planta de Kvaerner:**

Estaba situada en la costa suroeste de Noruega. Comenzó a funcionar en 1985, pero un temporal en 1988 acabó destruyéndola.

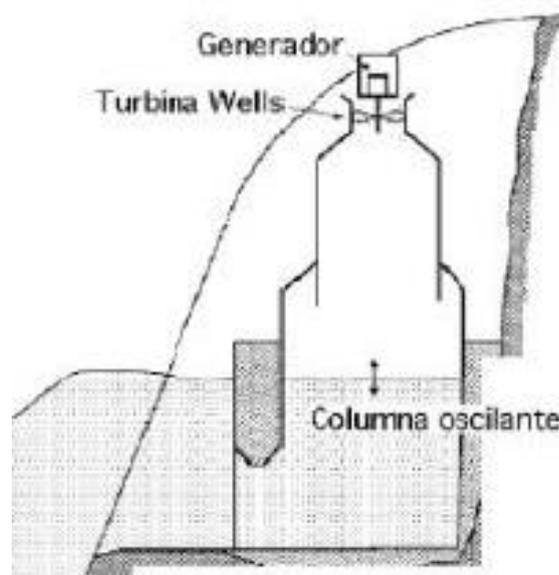


Figura 12. Esquema con el funcionamiento de la planta de Kvaerner – 'Fernández Díez'

Su emplazamiento era una zona acantilada en la cual se incrustó una cámara de aire de 10 metros de altura en la que entraba el agua por la parte inferior, sumergida hasta los 7 metros. En la parte superior de la columna, hecha de acero, se encontraba una turbina Wells que producía hasta 1000Kw.

- **Puerto de Sakata:**

En este puerto japonés se introdujo por primera vez la idea en la que está basada este trabajo: un convertidor de energía como parte del dique de un puerto. Se trata de un dique de cajones verticales de hormigón, ejecutado por el Ministerio de Transporte de Japón, y datando de 1989. Su uso también está basado en las turbinas Wells. Actualmente no se usa como productor de energía si no como lugar de pruebas para nuevos sistemas de columna de agua oscilante.

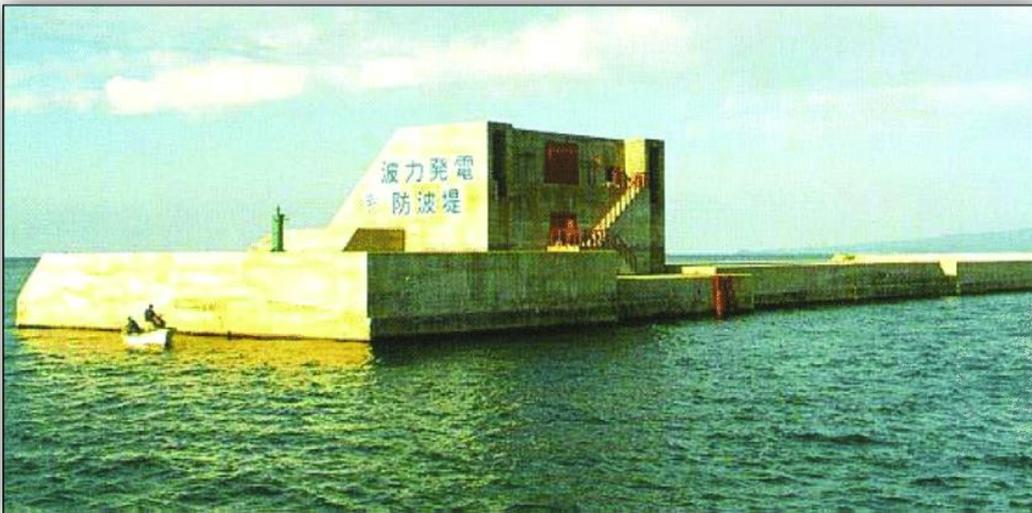


Figura 13. Fotografía del convertidor de energía del puerto de Sakata - 'Research Gate'

- **Convertidor de Vizhinjam:**

Este dispositivo se encuentra en la India, en el estado de Kerala. Fue implementado en 1991, constando de una cámara dentro de un

cajón de hormigón anclado en la parte delantera del rompeolas, con una turbina Wells vertical en la parte superior del cajón. En este caso, la estructura fue rellena con arena para soportar el impacto del oleaje.



Figura 14. Fotografía del dispositivo OWC de Vizhinjam - 'Madhyamam'

- **Dispositivo OWC Osprey:**

Este sistema se encontraba situado en la costa escocesa, en aguas someras, de manera que disponía de un oleaje más energético que un OWC situado en la línea de costa. Fue construido en 1992,

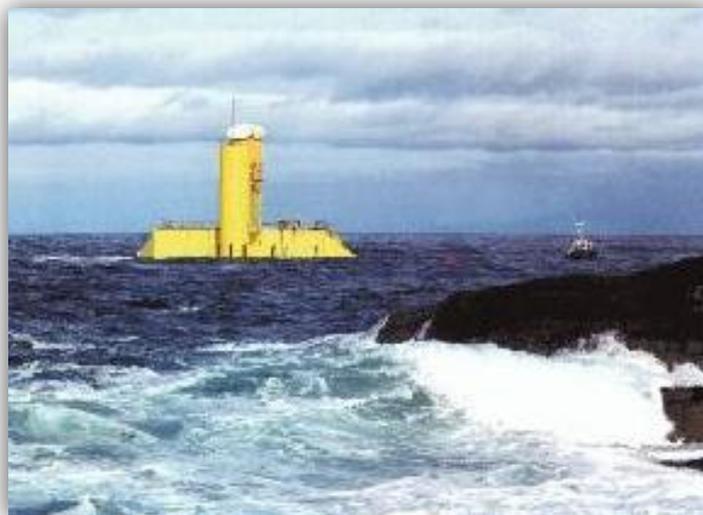


Figura 15. Fotografía del dispositivo OWC de Osprey - 'Tesisat'

siendo el dispositivo con mayor potencia hasta entonces, con 2MW.

Se puede describir como una especie de boya semiesférica de acero, de 20m de altura, dentro de la cual se encontraban dos turbinas Wells. El dispositivo de Osprey sufrió las consecuencias de encontrarse en aguas someras, siendo destruido en 1996 debido al fuerte oleaje. Actualmente se estudia el desarrollo del Osprey 2, pero esta vez diseñado en hormigón, para resistir mejor los temporales.

- **Dispositivo OWC de Sabón:**

Está localizado en la central térmica de Sabón, en La Coruña, tratándose del primer OWC que se construye en España. Se encuentra situado en un pozo que comunica con el mar, basándose su funcionamiento en la instalación hidráulica del sistema de refrigeración de la central.

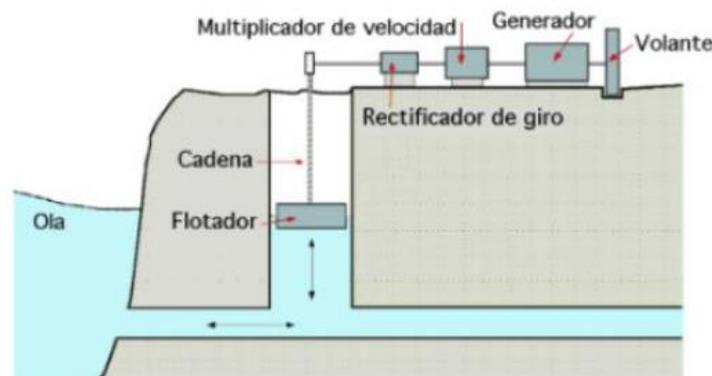


Figura 16. Esquema de funcionamiento del dispositivo OWC de Sabón – ‘Fernández Díez’

- **Planta de Cachorro:**

Esta central fue diseñada por el Instituto Superior Técnico de Lisboa en 1996, encontrándose en la isla portuguesa de Pico, en el archipiélago de las Azores. Está conectado a la red actualmente, habiendo llegado a una eficiencia máxima de un 70%. En sus orígenes fue ideada como prototipo de pruebas a escala real pero

finalmente fue viable para suministrar la electricidad necesaria de Pico. Es una estructura de hormigón hueca, sobre la superficie del mar, con una turbina Wells en su interior. El elemento distintivo de esta planta es un canal natural que conduce el oleaje hasta el propio sistema de transformación energética.



Figura 17. Fotografías del elemento OWC de la isla de Pico - 'Research Gate'

- **Limpet 500:**

Este dispositivo es el primero del mundo conectado a la red a escala comercial, funcionando desde el año 2000 hasta nuestros días.

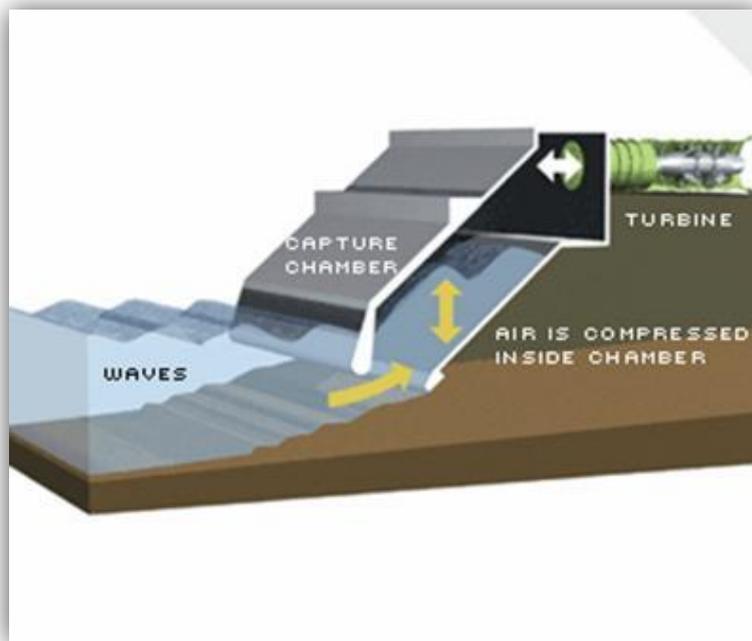


Figura 18. Esquema de funcionamiento del dispositivo Limpet 500 - 'ESRU Strath'

Se encuentra en la isla de Islay, en Escocia, y tiene una disposición inclinada. El sistema alimenta dos turbinas Wells, siendo la potencia total instalada de 500Kw. Este convertidor fue el fruto de una serie de prototipos anteriores, menos eficaces pero que sirvieron de investigación.

- **Dispositivo OWC Energetech:**

Emplazado en Port Kembla, cerca de la ciudad australiana de Sidney, este sistema fue puesto en funcionamiento en el año 2005.

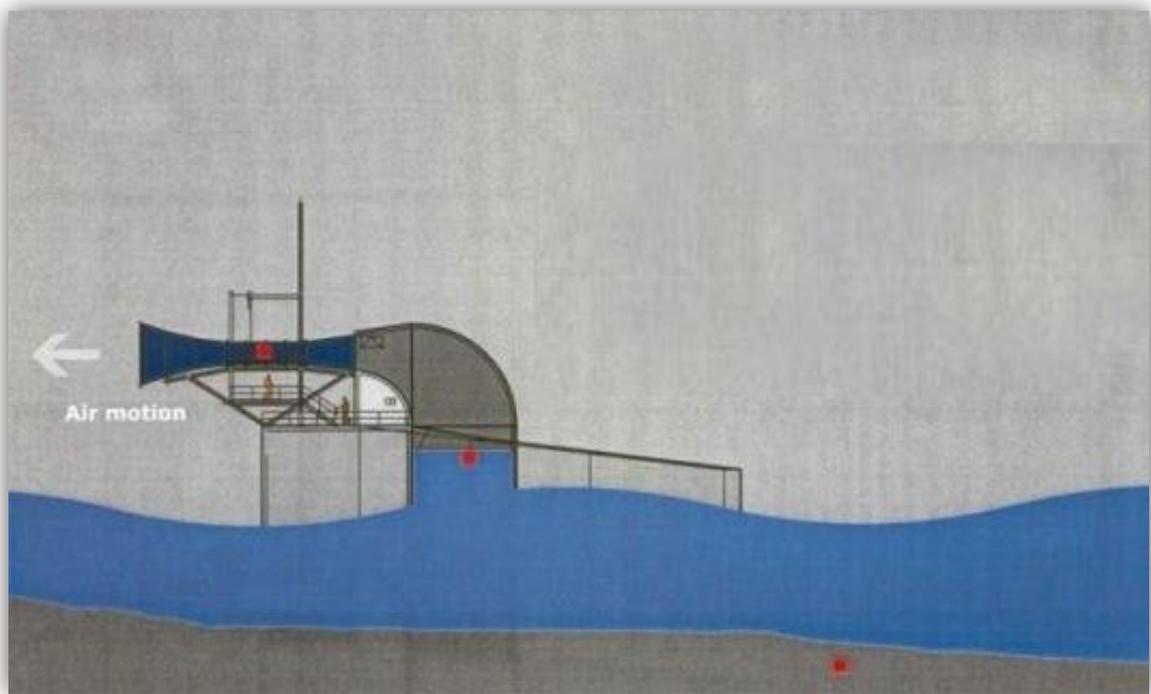


Figura 19. Esquema de funcionamiento del dispositivo OWC Energetech - 'New Atlas'

Se caracteriza por el uso de una turbina diferente, la Dennis Auld, que tiene un rendimiento algo mayor que la turbina Wells. Además, está diseñado para funcionar en la línea de costa, pues consta de un muro parabólico anclado en las zonas poco profundas que concentra el oleaje en el colector.

- **Ocean Energy Buoy:**

Se trata de un dispositivo situado en la bahía de Galway, Irlanda. Lo sorprendente de este es que la apertura de la cámara se encuentra en la parte trasera, en sentido contrario al oleaje. Se encuentra operativo desde el 2006.

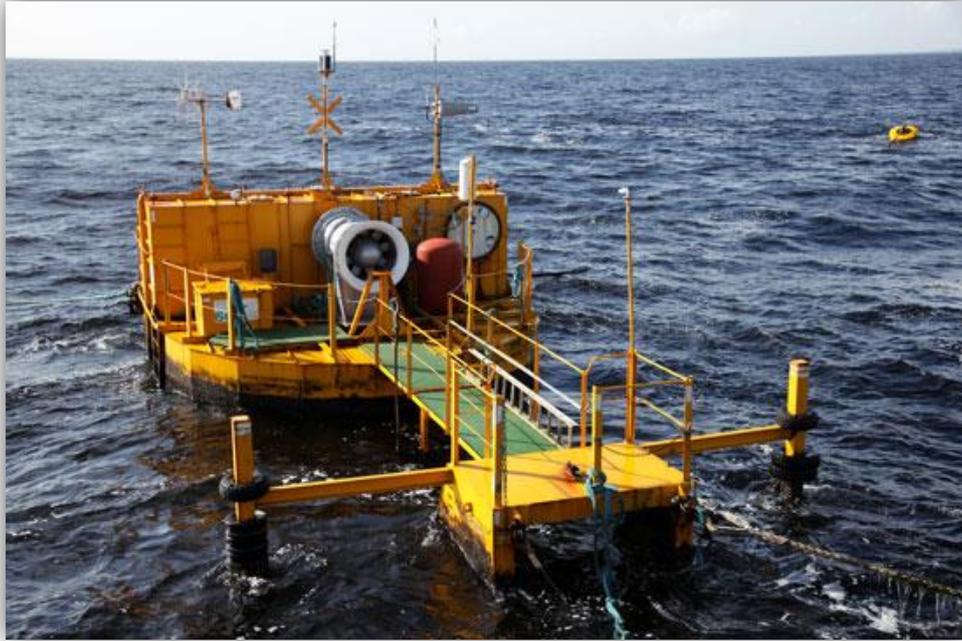


Figura 20. Fotografía del Ocean Energy Buoy, en Irlanda - 'Ocean Energy'

3- CUERPO DEL INFORME

3.1 Emplazamiento de la obra

Este proyecto estará situado en la zona portuaria de la localidad granadina de Motril, siendo concretamente una continuación del actual “Muelle dique” del puerto de la citada localidad.

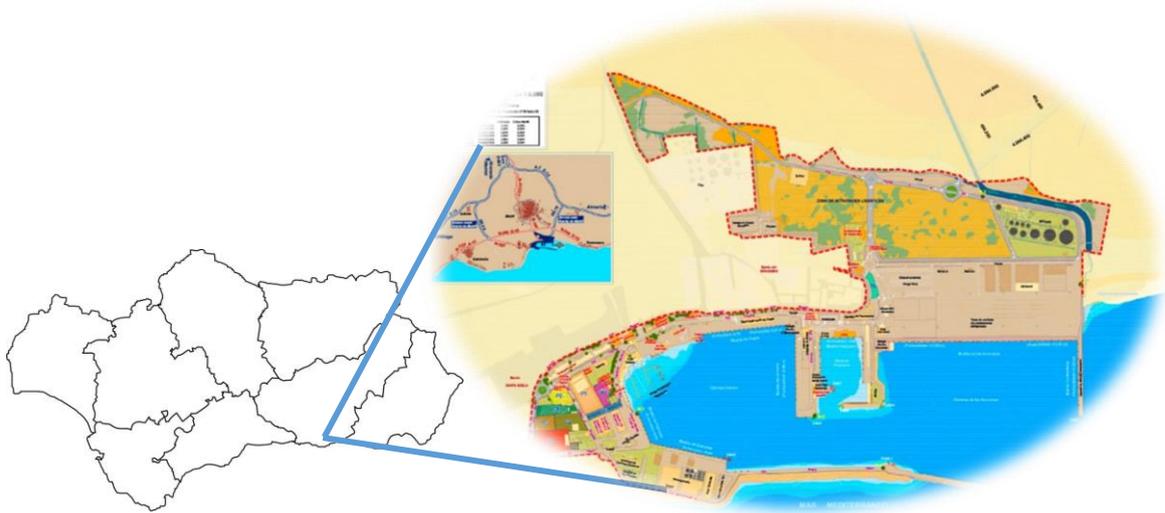


Figura 21. Localización del puerto de Motril en Andalucía - 'AP Motril'

Este municipio se encuentra en la parte central de la comarca de la Costa Granadina, en la provincia de Granada y en la comunidad autónoma andaluza. Está a orillas del mar Mediterráneo, y limita con los municipios de Salobreña, Vélez de Benaudalla, Lújar y Castell de Ferro. El municipio motrileño tiene 60.420 habitantes.

Las coordenadas de la ubicación portuaria son:

Latitud: 36° 43' 06." N

Longitud: 3° 31' 30.0" O



Figura 22. Vista aérea de la zona portuaria de Motril - 'Google Maps'

3.2 Índices de repercusión de la obra

En este punto se determinarán los índices de repercusión social y ambiental de la obra para empezar a estimar la problemática de la construcción de la misma. *Antonio Moñino et al, 2015*

3.1.2 Carácter general. Índices IRE e ISA

El carácter general de la obra indica la magnitud de la misma desde el punto de vista económico, social y ambiental en el caso de la ruina del tramo de obra o de la pérdida total de las capacidades del mismo para su correcto funcionamiento.

Obtendremos el carácter general de nuestra obra mediante los índices de repercusión económica (IRE) y de repercusión social y ambiental (ISA), pero antes de proceder a este cálculo, es necesario considerar un modo principal de fallo de la obra, el cual nos proporcionará el índice más alto. Consideraremos pues un modo de fallo asociado a un ELU de destrucción total del dique, lo que nos dejará del lado de la seguridad.

- **IRE:** Este índice tiene en cuenta las repercusiones económicas debidas a la reconstrucción de la obra y al cese o afección de las actividades producidas en ella.

$$IRE = \frac{Crd + Cri}{Co}$$

En esta ecuación podemos distinguir una serie de parámetros. El primero de ellos es el *Crd*, el cual corresponde al coste de inversión de las obras de reconstrucción de la obra marítima a su estado previo a su destrucción, en el año en que se valoren los costes por cese o afección de las actividades económicas directamente relacionadas con la obra. Se puede considerar que este coste es igual a la inversión inicial debidamente actualizada al año de estudio.

Para este coeficiente *Crd*, deberíamos tomar un valor estimado de la construcción de la obra. Por similitud con otros proyectos, el valor inicial será de **7 millones de euros**.

Por otro lado, tenemos el parámetro *Cri*, el cual tiene en consideración las repercusiones económicas debidas a la parada de la realización de las actividades económicas relacionadas con la obra, como servicios ofrecidos o demandados. Este término es valorado desde el punto de vista del Valor Añadido Bruto durante el periodo que se estima que durará la reconstrucción. Se puede considerar que la consolidación de las actividades económicas que

tengan que ver con la obra se produce transcurridos un número de años en torno a 5, y el período de reconstrucción será de 1 año. Este parámetro depende a su vez de una serie de coeficientes: el coeficiente A , que representa el sistema productivo al que sirve la obra, el B , que nos dice la importancia estratégica del sistema económico y productivo al que sirve la obra, y el coeficiente C , que representa la importancia de la obra para el sistema económico y productivo.

El coeficiente Cri tiene una expresión de cálculo:

$$CRI = Co * C(A + B)$$

El parámetro A de la fórmula cuantifica el ámbito del sistema productivo al cual sirve la obra. El puerto de Motril tiene una función

principal comercial, con comunicación con el norte de África y toda la zona mediterránea, por lo tanto, es lógico asignarle a este parámetro un valor de 5 (ámbito nacional/internacional).

El parámetro B tiene que ver con la importancia estratégica del sistema económico-productivo al que pertenece la infraestructura. Se puede considerar que el puerto de Motril forma un sistema de puertos de Andalucía oriental, sistema que tendría una importancia relevante, le asignamos un valor de 2.

En último lugar tenemos el parámetro C . Este nos indica cómo de importante es la obra para ese sistema anterior al que pertenece. En este sistema estaría un puerto de la relevancia de Málaga, por lo que podemos poner al de Motril en un escalón inferior, con un valor de importancia de 2 (relevante).

Con los parámetros ya cuantificados podemos calcular el valor de *Cri*.

$$CRI = 3 \text{ mill€} * 2(5 + 2) = 42 \text{ mill€}$$

El último parámetro de la ecuación es C_o , el cual adimensionalizará el resultado. Su valor tiene distintas posibilidades según la estructura económica y el nivel de desarrollo económico del país en el que se vaya a emplazar el proyecto. Es obvio que dependerá del tiempo. Según la ROM, en España este valor se adopta como 3mill€.

Con todos los coeficientes calculados, el IRE queda de la siguiente forma:

$$IRE = \frac{7 \text{ mill€} + 42 \text{ mill€}}{3 \text{ mill€}} = 16,3$$

- **ISA:** Este índice nos permite determinar de una forma cualitativa el impacto social y ambiental que podemos esperar si se produce una destrucción o la pérdida operativa total de la obra, teniendo en cuenta el alcance de pérdidas humanas, las afecciones producidas al medio ambiente y al patrimonio, así como la alarma social que pueda generarse. El ISA tiene en cuenta que el fallo se ha producido una vez que las actividades económicas que están relacionadas con la obra ya se han desarrollado y tienen un cierto nivel de consolidación.

$$ISA = \sum_{i=1}^3 ISA_i$$

De la ecuación del cálculo del ISA podemos deducir los 3 factores del sumatorio que influyen, los cuales serán los descritos anteriormente: ISA_1 el relacionado con la pérdida de vidas humanas, ISA_2 el que incluye los daños en el medio ambiente y el patrimonio, e ISA_3 el debido a la alarma social.

Se procede a la estimación de estos parámetros.

En cuanto al ISA_1 podemos considerar que la probabilidad de pérdida de vidas humanas en el caso de la destrucción de la obra es baja, ya que podríamos tener en cuenta en todo caso a los operarios que se encuentren trabajando en ese momento crítico sobre el dique. Se le asigna un valor de 3 (probabilidad baja).

El parámetro ISA_2 puede adquirir un valor de 2 (bajo), pues los daños ocasionados al medio ambiente o al patrimonio no son de gran relevancia. En algunos casos muy concretos puede que alguna especie de la zona se vea afectada o incluso la destrucción de alguna playa por el posicionamiento del dique.

El último parámetro que tiene repercusión en el cálculo del ISA es el ISA_3 . La ciudad a la que pertenece el puerto no es de las más importantes del país. Sin embargo, esta zona costera sufre todos los años destrucciones de diques menores y de playas, cosa que mantiene el enfado de los lugareños. Una destrucción de una obra tan importante causaría aún mayor revuelo. Por lo tanto, le asignaremos un valor de 10 (alta).

El valor final del índice ISA será:

$$ISA = 3 + 2 + 10 = 15$$

3.1.2 Carácter operativo. Índices IREO e ISAO

El carácter operativo de la obra tiene en cuenta las repercusiones

económicas, sociales y ambientales que se dan cuando el nivel de operatividad se ve reducido por diferentes causas. Siendo rigurosos, es importante saber que en la obra cada tramo funcional ha de tener un carácter operativo diferente, pues los hechos que provoquen la parada de la actividad en alguno de los tramos puede que no tengan el mismo efecto sobre los demás tramos de la misma.

Al igual que el carácter general de la obra, el carácter operativo se estima mediante dos índices.

- **IREO:** Este índice nos da la capacidad de cuantificar el coste que implicaría una parada operativa de la obra o del tramo de obra en cuestión, calculándose con una serie de parámetros que tienen en cuenta diferentes situaciones.

$$IREO = F(D + E)$$

Entre los parámetros comentados, existen el F , relacionado con la capacidad de adaptación que tienen tanto la demanda como el entorno económico ante la reducción de la operatividad, el parámetro D , el cual caracteriza si el período en que se produce la demanda y el período en que se produce la parada operativa son simultáneos o no, y por último el coeficiente E , que establece cuál es la intensidad de uso de la demanda durante el período que estamos teniendo en cuenta.

En nuestro caso, el parámetro D ha de tomar un valor de 5 (simultáneo), pues es muy probable que la demanda y la reducción de operatividad se produzcan a la vez, ya que la entrada de buques en el puerto es independiente de cuando se produce el problema.

El parámetro E está muy relacionado con el anterior. No podemos controlar como de intensa será la demanda en el momento de la

parada, por lo que lo más sensato es asignarle un valor medio de 3 (intensivo).

Como último parámetro del IREO, existe el F . La intención es que el gasto energético del puerto se vea abastecido con lo producido en la central undimotriz. Por lo tanto, podemos decir que una parada en el funcionamiento de la obra provoca una baja adaptabilidad de la demanda. El valor será 3 (adaptabilidad baja).

El valor final de nuestro índice IREO es:

$$IREO = 3(5 + 3) = 24$$

- **ISAO:** Se trata del índice de repercusión social y ambiental operativo. En este caso, gracias a este indicador podemos estimar cualitativamente hablando el impacto mediático y medioambiental que puede llegar a producirse, también debido a una detención en la operatividad de la infraestructura. Al igual que ocurría con el ISA , el $ISAO$ dependerá de unos factores muy parecidos, pero esta vez relacionados con la parada funcional y no con la destrucción de la obra.

$$ISAO = \sum_{i=1}^3 ISAO_i$$

El primer parámetro es el $ISAO_1$, relacionado con la posibilidad de que por culpa de la parada operativa se pierdan vidas humanas. El $ISAO_2$ tiene que ver con los perjuicios que pueden producirse sobre el medio ambiente y el patrimonio de la zona de influencia de la obra. En último lugar, el $ISAO_3$, cuantifica la alarma social.

Es bastante común que en obras de infraestructura marítima el

ISAO adquiera un valor nulo. Esto es así porque si se produce un cese en las operaciones cotidianas de la obra, las causas principales de impacto cesan, al menos normalmente. Esto puede ser distinto en tipos de proyectos muy concretos, como en tomas de agua para plantas de desalinización, donde es vital el funcionamiento correcto y constante, ya que en el caso contrario la alarma social y el impacto ambiental puede tener una magnitud importante.

El valor que tiene el primer parámetro será 0, pues la pérdida de vidas humanas por una parada operativa en la central undimotriz es muy remota.

En cuanto al $ISAO_2$, los daños en el medio ambiente y patrimonio pueden ser considerados como bajos (valor 2). Lo que nos lleva a pensar en este valor es la necesidad de usar otra energía en el caso de que el dique se encuentre inoperativo.

El último parámetro que afecta al ISAO es el que tiene en cuenta la alarma social por parada operativa. Es lógico asignarle un valor de 5 (media), pues debido a los ya comentados comunes destrozos en obras marítimas de la zona y a los siempre presentes condicionantes políticos, este componente social siempre es un factor a tener en cuenta.

$$ISAO = 0 + 2 + 5 = 7$$

Como resumen, en la siguiente tabla pueden observarse los índices calculados:

Índice de repercusión económica, IRE	16,3
Índice de repercusión social y ambiental, ISA	15
Índice de repercusión económica operativo, IREO	24
Índice de repercusión social y ambiental operativo, ISAO	7

Tabla 1. Valores de los índices de repercusión de la obra

3.3 Valores recomendados de la obra: Vida útil, probabilidades de fallo y operatividad

El cálculo de los índices de repercusión sirve para obtener una serie de parámetros muy importantes para la obra.

Mediante el IRE conseguimos el valor de la vida útil:

IRE	≤ 5	6 – 20	> 20
Vida útil	15	25	50

Tabla 2. Valores de la vida útil del proyecto en función del IRE

Según los valores estimados de la ROM, la vida útil de nuestro proyecto sería de **25 años**, teniendo en cuenta nuestro IRE es de 16,3.

Mediante el ISA podemos obtener los valores de probabilidad conjunta de fallo:

ISA	< 5	5 - 19	20 - 29	≥ 30
Pf ELU	0,2	0,1	0,01	0,0001

Tabla 3. Valores de la probabilidad conjunta de fallo en función del ISA

Con los valores de las tablas podemos observar que tanto la probabilidad conjunta de fallo frente a estado límite último (ELU) como la probabilidad conjunta de fallo frente a estado límite de servicio son de **0,1**.

Utilizando los índices IREO e ISAO estimamos los parámetros relacionados con la operatividad:

ISA	< 5	5 - 19	20 - 29	≥ 30
Pf ELS	0,2	0,1	0,07	0,07

Tabla 4. Valores de la probabilidad de parada operativa en función del ISA

IREO	≤ 5	6 – 20	> 20
Operatividad	0,85	0,95	0,99

Tabla 5. Valores de la operatividad en función del IREO

ISAO	< 5	5 - 19	20 - 29	≥ 30
Nº de paradas	10	5	2	0

Tabla 6. Valores del número de paradas operativas en función del ISAO

De las tablas obtenemos un valor de operatividad de **0,99** y **5** paradas anuales.

Lo más importante de toda esta serie de cálculos y de parámetros es que podemos calcular el período de retorno, lo cual es vital para el diseño de la obra marítima:

$$T = \frac{1}{1 - (1 - 0,1)^{\frac{1}{25}}} = 237,78 \text{ años}$$

Todos estos parámetros que se han estimado mediante la normativa, son de vital importancia a la hora del cálculo y el diseño del dique, ya que de ellos dependerá el tipo de olas que podrá soportar este.

Vida útil	25 años
Probabilidad de fallo frente a ELU	0,1
Probabilidad de fallo frente a ELS	0,1
Período de retorno	237,78 años
Operatividad	0,99
Nº de paradas anuales	5

Tabla 7. Valores recomendados de la obra

3.4 Elección del tipo de dique

Existen diferentes tipologías de diques, cada una con sus ventajas e inconvenientes: diques en talud, diques verticales, diques berma, diques mixtos, diques flotantes, diques sumergidos...

Para esta ampliación, basaremos nuestra elección en las dos tipologías más comunes, la de sección vertical y la de sección en talud. Comentaremos los puntos más ventajosos y más desfavorables desde el punto de vista económico, técnico y ambiental de las dos opciones, llegando a una conclusión final. *ROM*

3.4.1 Criterios económicos

La economía de la obra se verá influida por la construcción de la obra, el mantenimiento de la misma y el desmantelamiento final.

Dentro de la construcción, los factores que nos interesan son varios. Por un lado, los materiales son el elemento principal. Teniendo en cuenta que la profundidad es el punto de ejecución de la ampliación es de 13 metros, la construcción de cajones para toda la sección del dique sería más cara, siendo más común la ejecución de diques en talud para profundidades relativamente pequeñas, inferiores a los 18m.



Figura 23. Piezas de hormigón en forma de dolo para diques en talud – ‘Universidad Politécnica de Valencia’

Además, la propia maquinaria utilizada para la construcción de la estructura vertical (cajonero, remolcadores...) hace más cara la ejecución, frente al uso de embarcaciones como cabrias, pontonas y gánguiles. El componente que limita la elección de dique en talud es la mano de obra, pues este tiene un proceso de ejecución más lento.

Uno de los puntos más importantes en una obra civil es la conservación y la reparación de la misma, muy relacionada con los modos de fallo considerados. En el caso del dique en talud, habría que reconstruir mediante grúas el tramo afectado, mientras que el dique vertical requeriría una sustitución del cajón dañado, una reparación muy cara y difícil de ejecutar, debido a la complejidad del fondeo de los cajones.



Figura 24. Maniobra de fondeo de los cajones de un dique vertical – ‘DOVICAIM’

Por último, el punto más obvio dentro de los factores económicos es el desmantelamiento, pues parece normal pensar que el desmantelar el dique en talud es un proceso mucho más costoso.

CRITERIOS ECONÓMICOS	DIQUE EN TALUD	DIQUE VERTICAL
Construcción	FAVORABLE	DESFAVORABLE
Mantenimiento	FAVORABLE	DESFAVORABLE
Desmantelamiento	DESFAVORABLE	FAVORABLE

Tabla 8. Criterios económicos para la elección del tipo de dique

3.4.2 Criterios técnicos

Para hablar de los criterios técnicos también utilizaremos la perspectiva de la construcción, la conservación/repación y el desmantelamiento.

Técnicamente, la construcción de un dique vertical necesita de unas ventanas climáticas muy restringidas en cuanto a sus condiciones, sobre todo por el fondeo de los cajones, requiriéndose velocidades de viento por debajo de 5m/s, períodos superiores a los 8s y alturas de ola significativa menores a 1m. En cuanto al dique en talud, la limitación constructiva es el vertido marítimo con gánguil. Esta etapa necesita que la altura de ola significativa máxima sea 2,5m. De esta manera podemos garantizar días de trabajo incluso en la época invernal.

Desde el punto de vista del mantenimiento y el desmantelamiento, las limitaciones técnicas son similares a las económicas, pues las dificultades de reparación de un dique vertical y de la deshabilitación del dique en talud van acompañadas de un mayor gasto.

CRITERIOS TÉCNICOS	DIQUE EN TALUD	DIQUE VERTICAL
Construcción	FAVORABLE	FAVORABLE
Mantenimiento	FAVORABLE	DESFAVORABLE
Desmantelamiento	DESFAVORABLE	FAVORABLE

Tabla 9. Criterios técnicos para la elección del tipo de dique

3.4.3 Criterios ambientales

En este último apartado de factores para la elección del dique nos centramos en el impacto visual y ambiental que tendrá la tipología.

Constructivamente hablando, un dique en talud necesita de mucho más material de cantera, agota una mayor cantidad de recursos, teniendo además el dique vertical un impacto visual menor. Hablando en términos de conservación, el dique en talud, gracias a su porosidad permite que el

agua se oxigene con mayor facilidad, llegando a crear nichos ecológicos a distintos tipos de especies marinas. En cuanto al desmantelamiento, la única tipología beneficiosa para el medio ambiente es la vertical, ya que se puede realizar eliminando el impacto visual que tuviese, aun siendo menor que el de los diques en talud.

CRITERIOS AMBIENTALES	DIQUE EN TALUD	DIQUE VERTICAL
Construcción	FAVORABLE	FAVORABLE
Mantenimiento	FAVORABLE	FAVORABLE
Desmantelamiento	DESFAVORABLE	FAVORABLE

Tabla 10. Criterios ambientales para la elección del tipo de dique

3.4.4 Conclusión y elección

Tras estudiar los correspondientes criterios, vemos que las ventajas y las desventajas de cada tipología, en su conjunto, acaban siendo similares en cuanto a cantidad, pero elegiremos como sección para la ampliación la de dique en talud, principalmente por los factores económicos

3.5 Procedimiento constructivo

La idea de este proyecto es ampliar el muelle dique principal de la obra, de 860 metros de longitud, 13,5 metros de calado y 15 metros de ancho.

La mejor forma de actuar es construir el anexo al final de esta alineación principal, lo que se conoce como morro. Este dique es del tipo vertical, y nuestra nueva obra será un dique en talud discontinuo, pues situaremos la central undimotriz en una zona intermedia de la alineación, en cierto modo resguardada por distintos mantos en las zonas laterales.

Generalmente, un dique de abrigo en talud se suele construir con un núcleo de todo uno sobre el cual se van superponiendo diferentes capas

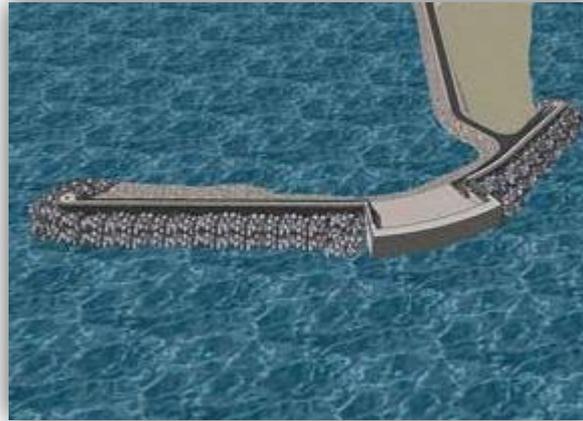


Figura 25. Imagen virtual del dique undimotriz de Motricu – ‘La Información’

de elementos de diferentes formas y que van creciendo en tamaño. A cada una de las capas se les conoce como mantos, secundarios y principales, según estén en la zona más superficial. Las piezas de estos mantos son de hormigón en masa, con formas cúbicas, tetrapodos...



Figura 26. Plano del puerto de Motril, destacando el dique a ampliar – ‘AP Motril’

La forma económica de rellenar estos mantos es con la utilización de escollera, aunque están limitadas en su tamaño, dependiendo de cómo se encuentren en las canteras de las que se consiguen, siendo el peso máximo de la escollera de 6 Tn.

La construcción de los diques en talud se puede hacer de dos formas principalmente. Una de ellas es la construcción marítima, la cual usa un equipo marítimo compuesto por embarcaciones como dragas, pontonas y cabrias, las cuales se encargan de los procesos de transporte y colocación. La otra forma de construir es el método terrestre, usando maquinaria de movimiento de tierras y grúas que se desplazarán por tierra o alineaciones ya construidas.

El proceso constructivo del dique tiene una característica distintiva. En una sección media del mismo se encontrará la central undimotriz, continuando después la alineación construida como un dique en talud común. *Miguel Ortega Sánchez, 2015*

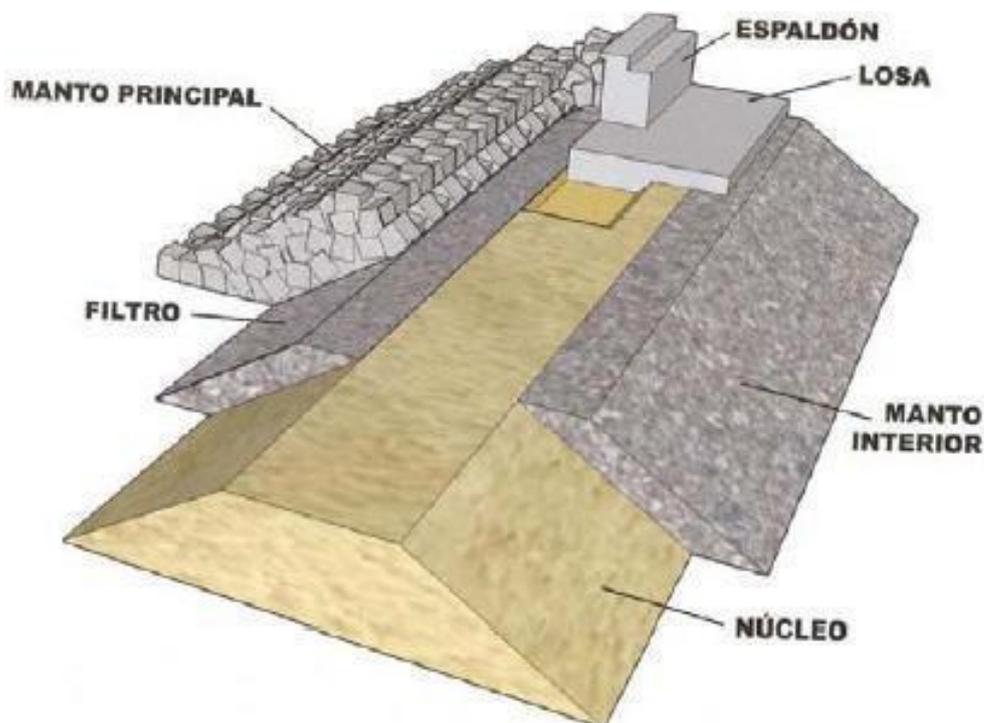


Figura 27. Esquema representando los elementos más destacados de un dique en talud – ‘ACB Puertos’

De este modo, las etapas de la construcción serán las siguientes:

1. Dragado:

Se realiza para llegar hasta el estrato deseado y adecuado para la obra. Con este proceso se suprime las capas más superficiales para evitar suelos no adecuados por no tener la capacidad portante necesaria para recibir las cargas del dique,

Para este procedimiento, lo más conveniente es utilizar una draga hidráulica. Las mejores opciones son la draga de succión en marcha y la draga de cortador, pero esta última tiene una limitación de altura de ola de unos 2m, por lo que usaríamos la draga de succión en marcha.



Figura 28. Proceso de dragado mediante una draga-gánguil – ‘Drag-Sur’

2. Núcleo:

Esta fase ha de realizarse de manera escalonada, ya que el peso del material que compone el núcleo es menor que el del resto de capas, por lo que pueden ser arrastrados por el mar con una mayor

facilidad. Por este motivo, limitaremos la máxima distancia de avance en unos 10m, quedando así el dique protegido ante los temporales.

En este caso, la embarcación utilizada para el avance es el gánguil, el equipo más característico para el vertido de escolleras.



Figura 29. Gánguil de apertura por fondo, convertible a draga mediante grúa-celosisia – ‘Cyes Maritime Works’

Existen gánguiles de compuertas, de apertura por fondo y de vertido lateral. Estas embarcaciones suelen trabajar con alturas de ola significantes inferiores a 2m, y pueden tener capacidades de hasta 1000m³.

El núcleo está formado por pedraplén, el cual será vertido primero de manera marítima con el gánguil. Una vez alcanzada la cota -2, comienza el vertido de manera terrestre, con camiones, los cuales llegarán por la alineación original. Una vez el camión deja el material sobre la superficie, es empujado con un bulldozer.

3. Mantos

Las sucesivas capas de piezas, de escollera o piezas artificiales se ejecutan una vez finalizado el núcleo. Es común colocar primero una berma de pie que proteja adecuadamente el terreno y la

cimentación, sirviendo de apoyo para los mantos secundarios y principal.

Después de la berma de protección, se ejecuta una primera capa que haga de filtro, y luego una serie de mantos, los cuales se encargan de la capacidad portante de la estructura. Las piezas de los mantos van creciendo en peso conforme la capa es más exterior.

Las piezas de estas capas suelen ser cubos de hormigón, los cuales son fabricados en plantas destinadas a ello, y después son trasladadas al lugar de interés.



Figura 30. Proceso de ejecución de los mantos desde el propio dique mediante grúa – ‘Grúas Aguado’

En la plataforma original se colocan una serie de grúas con pluma de celosía, que irá colocando las piezas, una a una si son de hormigón, tanto en el manto principal como en el secundario, y de manera aleatoria o desordenada.

Hay una gran variedad de piezas que pueden colocarse en los mantos: cubos, tetrápodos, dolos...

4. Losa

Este elemento tiene una vital importancia, pues sirve como confinamiento para los sistemas granulares inferiores. Además, ha de hormigonarse lo más cerca posible del avance.



Figura 31. Proceso de ejecución del encofrado de la losa – ‘Pipo Agu’

5. Espaldón

El espaldón es la finalización de un dique en talud clásico. Su papel más importante es el de soporte de elementos superiores, como futuras grúas.

Este elemento se realiza en tongadas, con un módulo de encofrado rodante de 10 a 15 metros de longitud, sustentados con unos carretones que van desplazándose rodando sobre las partes contiguas ya ejecutadas del espaldón. Colocado el carretón, se colocan los encofrados, se hormigona desde tierra con sistemas de tolva y camiones bomba. Una vez curado el hormigón, se separan los encofrados y se colocan en la siguiente posición.

6. Cimentación de la central y armado

Se quiere intercalar el dique en talud con la central, de piezas

prefabricadas verticales. Esta parte de la alineación necesitará una capa de hormigón de regularización de unos 20 cm sobre la cual se construirá una losa armada de 90 cm. de espesor, que sirve de base de apoyo a las piezas prefabricadas. Además, la cimentación se completará realizando anclajes con redondos de ϕ 32 empotrados 1,5 metros en roca, y arranques introducidos 80 cm en la losa que quedarán embebidos en el hormigón de relleno de las celdas.



Figura 32. Equipo de buzos ejecutando la correcta colocación de los redondos de acero – ‘Caminos País Vasco’

Hay que tener en cuenta que durante la ejecución de esta parte del dique se necesitarán como protección bloques de un peso recomendable 25Tn, hasta que la estructura de celdas verticales esté finalizada.

7. Piezas prefabricadas

La ejecución de las piezas prefabricadas se realizará en el ámbito de la obra. Es importante que el hormigón utilizado sea del tipo IIIc+Qb, debido a las condiciones adversas que tendrá que sufrir al estar sumergido en contacto con el agua del mar. En todas las piezas prefabricadas se dejarán una serie de tubos pasantes para poder

izarlas posteriormente con la grúa. La colocación final de cada una de las piezas se realizará desde la plataforma del dique, utilizando una auto grúa de celosía sobre orugas.

Además, se utilizará la ayuda de buzos, operarios muy importantes en la construcción de este tipo de obras, ya que corrigen pieza a pieza las desviaciones que pudieran existir en la disposición de cada una de ellas.

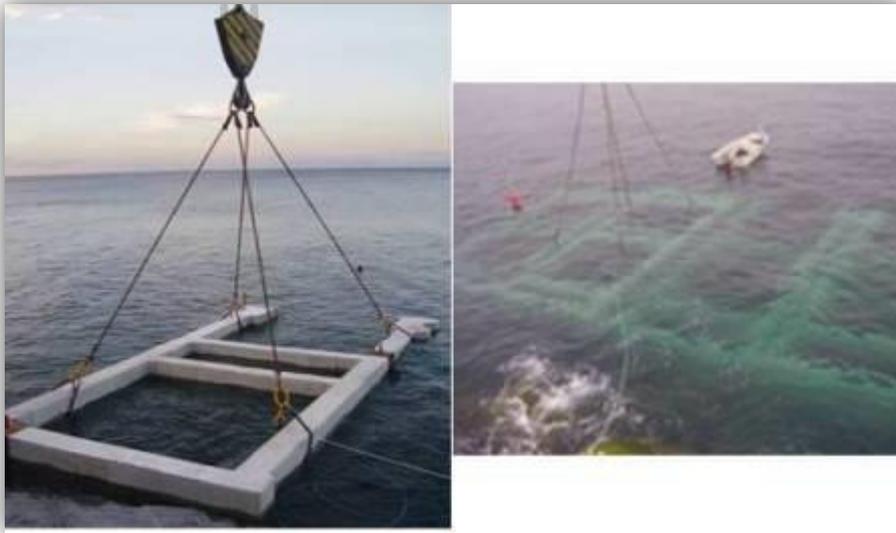


Figura 33. Colocación de las piezas prefabricadas mediante el uso de grúa – ‘La Información’

8. Hormigonado de celdas

Una vez colocadas las piezas en su posición definitiva, se rellenarán con hormigón sumergido con bomba las celdas interiores para así estar seguros de que la estructura se comportará de manera robusta. A partir de la cota 0,00 las celdas se rellenan con pedraplén. Posteriormente se procede a rellenar de hormigón las juntas verticales entre las diferentes columnas, utilizando a modo de encofrado perdido, tubos de PVC rellenos de hormigón armado a modo de pilote. Durante esta fase, la traza del dique y la sección vertical que se va formando con la disposición de las diferentes piezas, siguen estando separadas por el mar y por una protección

de bloques de 25Tn. Seguidamente se procederá a retirar la protección de los bloques y a cerrar lateralmente la central mediante la disposición de las piezas prefabricadas bicelulares, más pequeñas que las que formarán la galería de turbinas, y a unir ambos cuerpos, el de la central y el del núcleo de la traza del dique de abrigo. El material de relleno que se utiliza en el trasdós de la central será pedraplén.



Figura 34. Finalización de la plataforma de unión de las celdas con el dique – ‘Caminos Euskadi’

9. Galería de turbinas

La ejecución de la galería de las turbinas se iniciará con el tapado de las columnas con losas prefabricadas a modo de encofrado perdido.



Figura 35. Tapado de las celdas con losas prefabricadas – ‘Caminos País Vasco’

Encima de ellas se dispondrá una losa de hormigón armada de que albergará los agujeros, donde irán las turbinas. Es importante tener en cuenta las presiones de la columna de aire y el peso de las turbinas para el armado de la misma.

Además, para poder facilitar las conexiones de las instalaciones entre las diferentes estancias que componen la central, se han de prever canalizaciones que comuniquen entre sí todas las celdas.



Figura 36. Ejecución del manto de la región de sotamar – ‘Caminos País Vasco’

10. Construcción de la segunda sección en talud.

Se repetirán los pasos del 2 al 5, de manera que se finalizará completamente la alineación.



Figura 37. Fotografía aérea de la central de Mutricu finalizada, inspiración para la posible central de Motril – ‘Ente Vasco de la Energía’

3.6 Caracterización del clima marítimo

Antes del cálculo definitivo del dique necesitamos conocer las características climáticas que nos encontraremos en la zona cercana al emplazamiento de este.

En esta sección se mostrará la simulación de datos a partir del punto SIMAR 2041080, correspondiente a la costa motrileña, mediante el uso de la herramienta MATLAB. La predicción realizada será para los próximos 25 años, ya que es el ciclo de vida útil que se ha estimado para la ampliación del dique. Como se observará en las diferentes gráficas, el período cubierto en las series temporales empieza el 1 de enero de 2019 a las 0:00:00 y finaliza el 31 de diciembre de 2043 a las 21:00:00, cubriendo los 25 años deseados.

3.6.1 Viento

En primer lugar, se caracteriza el viento. Para ello, se representa la gráfica que nos muestran las distintas velocidades del viento para cada momento en el que se ha obtenido dato.

En cuanto a su velocidad, vemos que los valores máximos están dentro de un rango de 16-20 metros por segundo. El máximo alcanzado, traducido a kilómetros por hora, está muy cerca de los 72km/h.

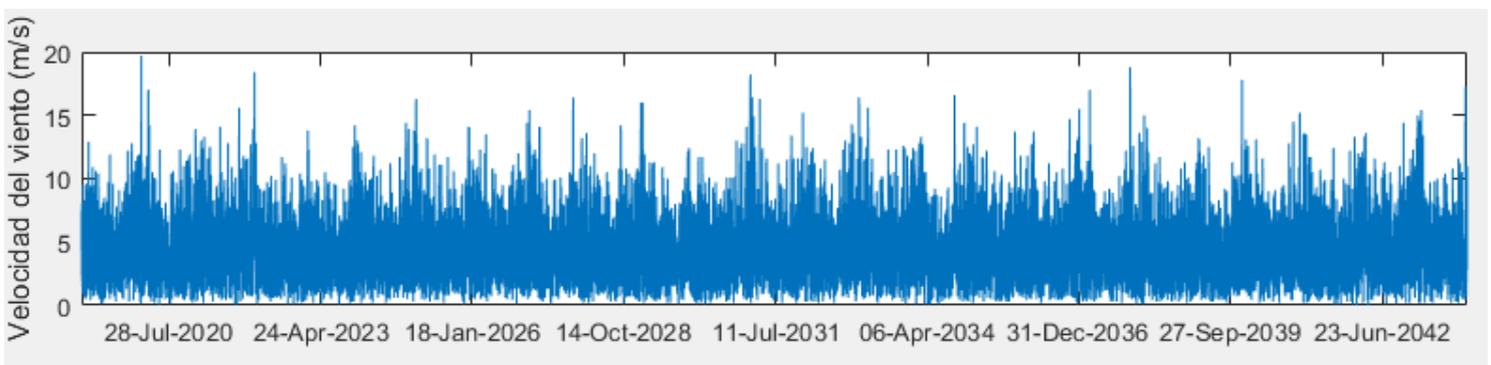


Figura 38. Representación de la velocidad del viento en m/s para cada dato de tiempo registrado

Otra figura que nos proporciona información sobre la descripción del fenómeno del viento es un histograma, en el cual podemos definir el número de ocurrencias de las distintas velocidades presentes en los datos considerados. Se puede observar que las velocidades que se suelen dar con mayor frecuencia son las que están entre los 3 y los 4 metros por segundo, 10,8 y 14,4 si convertimos el dato a kilómetros por hora.

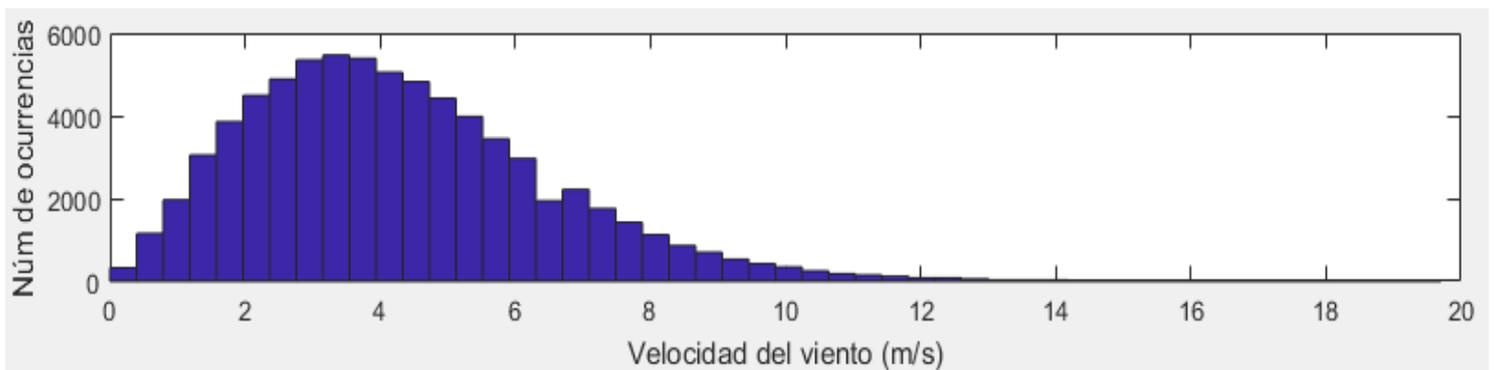


Figura 39. Histograma de la frecuencia de los distintos valores de velocidad del viento en m/s

La última gráfica con datos acerca del viento será el histograma que nos proporciona el número de ocurrencias de las distintas direcciones de procedencia que tendrá el viento para los datos simulados. Teniendo en cuenta que, en el eje de abscisas, el valor de 0 nos indica el norte, se puede interpretar que la dirección de procedencia predominante para el viento es la de 85 grados, muy cercana a la dirección Este.

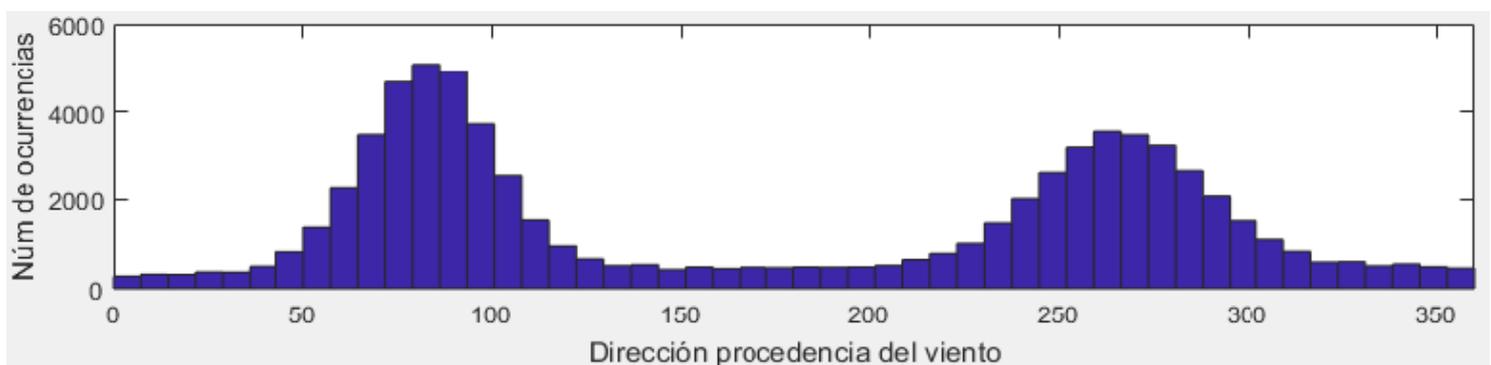


Figura 40. Histograma de la frecuencia de las distintas direcciones de procedencia del viento, siendo el valor 0 el norte, avance horario

Una buena forma de aglutinar los datos del viento en una gráfica es la rosa de los vientos, gracias a una función programada en MATLAB. De esta manera podemos observar por un lado las direcciones de procedencia de viento predominantes, según la orientación de las porciones de corona circular, el valor de la velocidad, según el color de la porción, y por último las velocidades más frecuentes en función del tamaño de las distintas porciones.

Con estas directrices sacamos las mismas conclusiones que con las gráficas individuales: se observa claramente la procedencia del viento, muy cercana a los 90 grados y la mayor cantidad de sucesos, pues las secciones mayores en la figura son las que tienen una velocidad de entre 2 y 4 m/s.

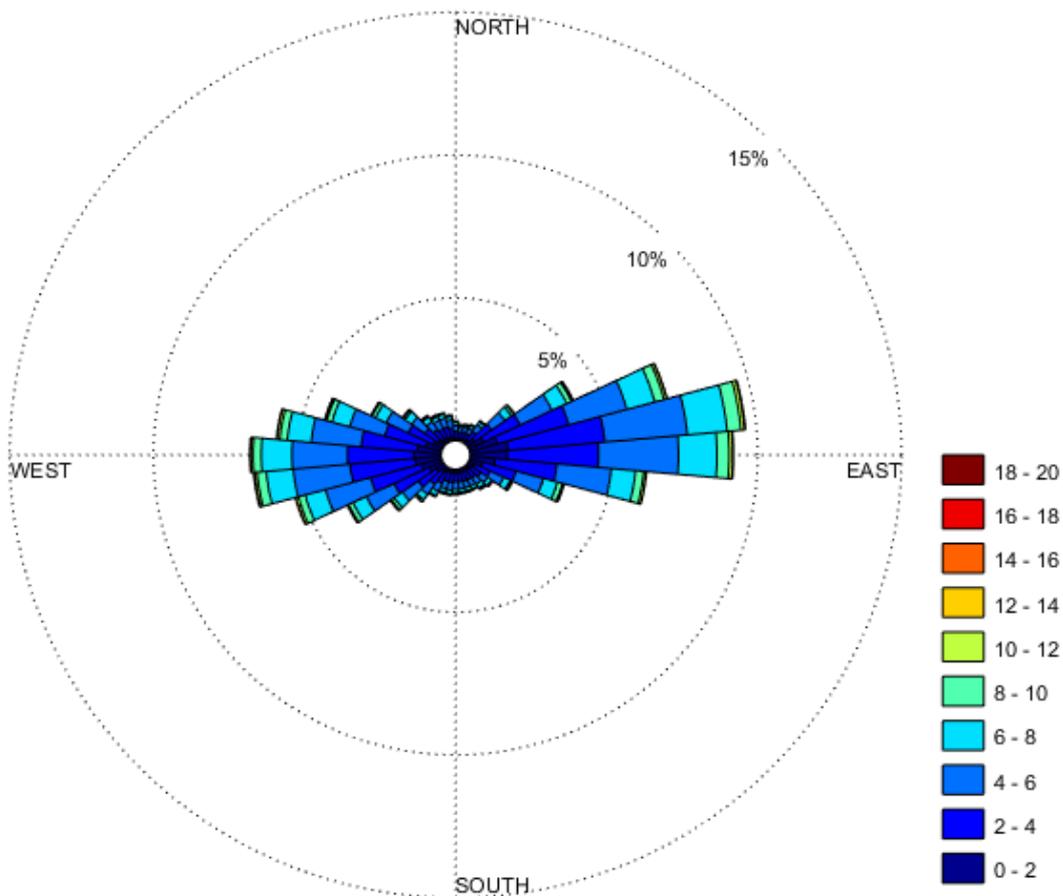


Figura 41. Rosa de los vientos que agrupa todos los datos de viento simulados

3.6.2 Oleaje

El segundo elemento importante para caracterizar el clima marítimo de la zona de estudio, y el cual nos servirá para el cálculo del dique, es el oleaje como tal.

Partiendo igualmente de los datos simulados, se puede obtener la gráfica que representa la altura de ola significativa para los próximos 25 años. Analizando esta serie de datos se puede decir que los valores de la misma varían normalmente dentro de un rango de 1 a 3 metros, llegándose a alcanzar valores de hasta unos 6 metros. Podemos darnos cuenta de que hay algunos valores anómalos, con una altura de hasta 11,9m, algo impensable en el Mediterráneo. Por esto es adecuado llevar a cabo un filtrado de los datos que se han simulado, eliminando del set las alturas de ola significativa mayores de 7 metros. De esta forma, representamos por un lado los datos originales, y por otro lado la gráfica que tiene en cuenta el filtro realizado para los valores climáticamente imposibles.

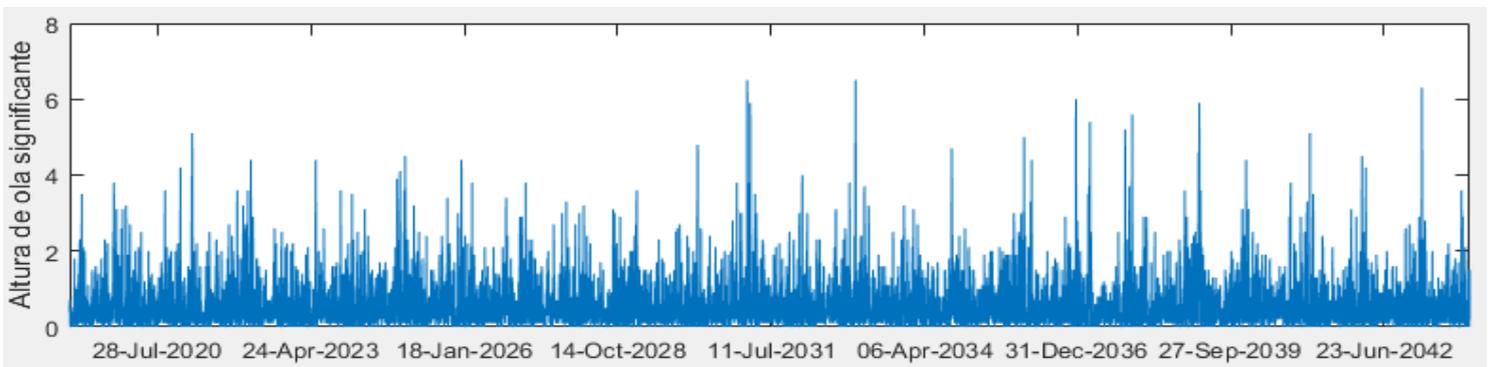


Figura 42. Representación de los valores de altura de ola significativa en metros para cada valor de tiempo registrado, tras el filtrado de datos ($H < 7m$)

Por otro lado, al igual que se ha hecho con los datos del viento, se pueden representar las direcciones de procedencia del oleaje, siendo estas muy similares a las del viento, dato que tiene sentido, ya que el viento es el principal generador de las olas.

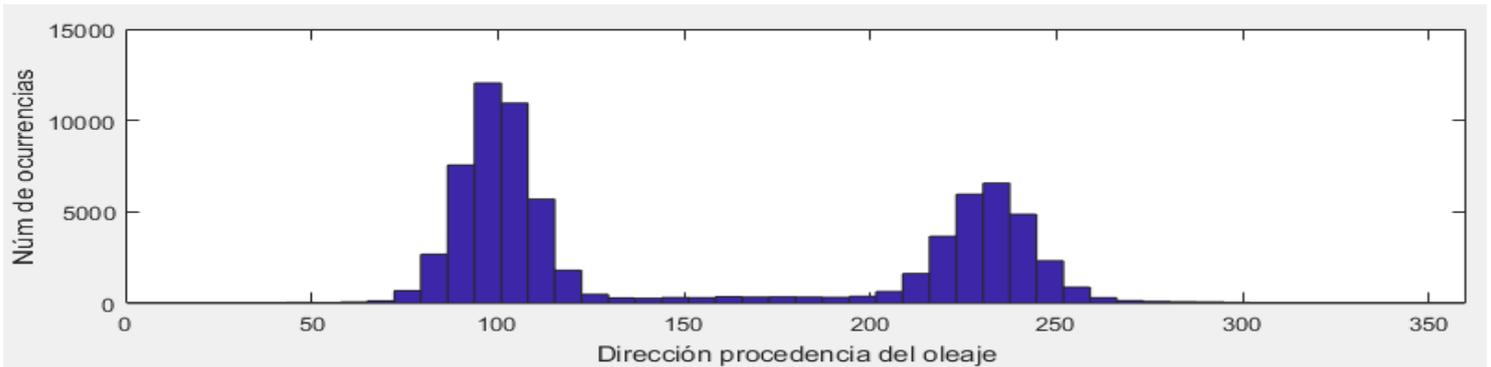


Figura 43. Histograma de la frecuencia de las distintas direcciones de procedencia del oleaje posibles, siendo el valor 0 el norte, avance horario

Como último gráfico para caracterizar el oleaje es adecuado obtener la relación que existe entre las variables de la altura de ola significativa y el período pico, de modo que se puede observar que generalmente los períodos de pico máximos suelen estar asociados a las mayores alturas de ola, siendo además el estado de mar más probable el que tiene una altura de ola en torno a 1 metro y un período pico de unos 4,5 segundos.

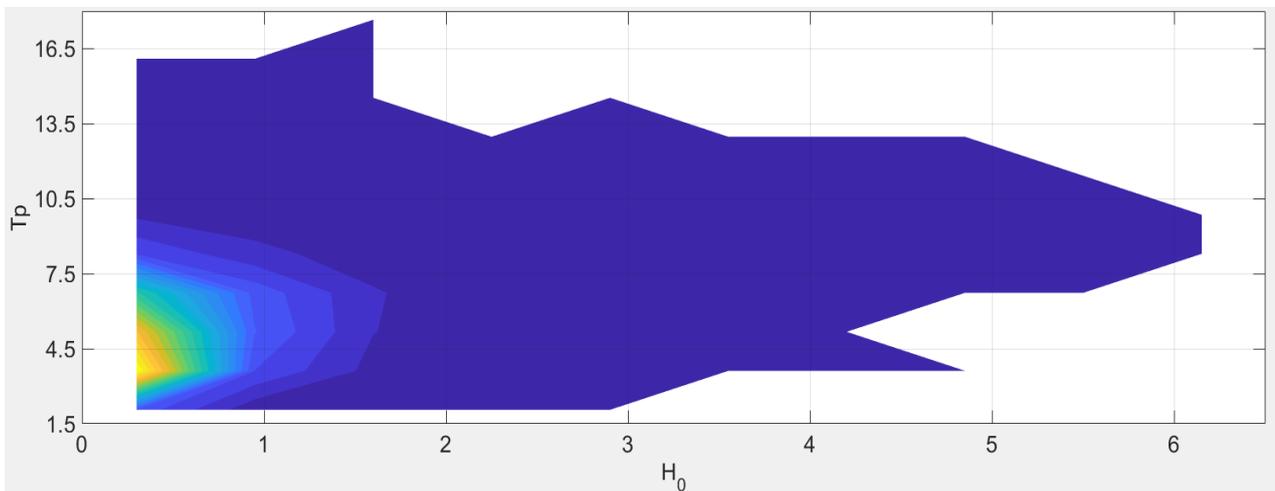


Figura 44. Densidad bivariada, figura que representa la altura de ola significativa frente a su período de pico asociado

3.6.3 Régimen extremal

Una vez definidos el oleaje y el viento que tendrán lugar en la zona

durante los próximos 25 años, se quiere determinar los parámetros de mejor ajuste a una distribución generalizada de valores extremos (GVE). Para llevar a cabo esa tarea es necesario encontrar en primer lugar los máximos anuales de altura de ola significativa, los cuales quedan representados en la siguiente gráfica.

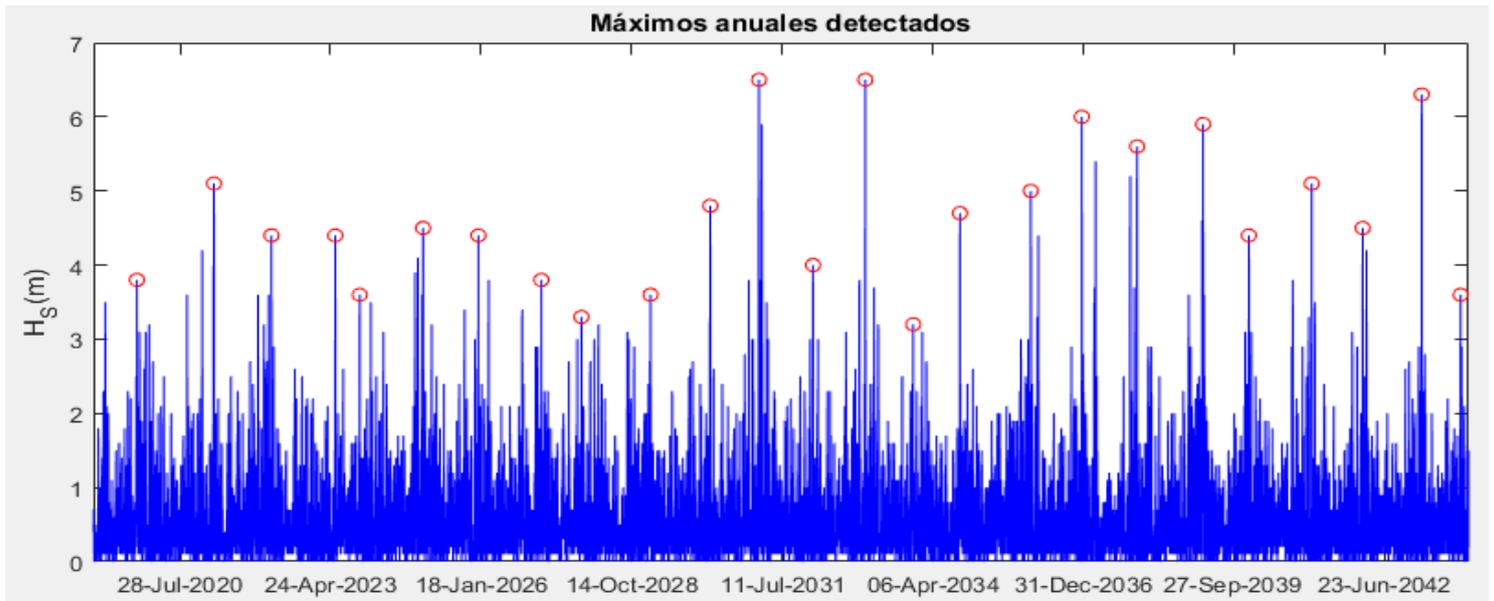


Figura 45. Representación de los valores máximos de altura de ola significativa de cada año registrado (2019-2043)

En la tabla a continuación pueden verse los valores máximos de altura de ola significativa para los años considerados.

2019	3,8m	2024	4,5m	2029	4,8m	2034	4,7m	2039	4,4m
2020	5,1m	2025	4,4m	2030	6,5m	2035	5m	2040	5,1m
2021	4,4m	2026	3,8m	2031	4m	2036	6m	2041	4,5m
2022	4,4m	2027	3,3m	2032	6,5m	2037	5,6m	2042	6,3m
2023	3,6m	2028	3,6m	2033	3,2m	2038	5,9m	2043	3,6m

Tabla 11. Valores máximos registrados de altura de ola máxima

Una vez obtenidos los valores máximos anuales se pueden representar según la función densidad de probabilidad ajustada según GEV, así como la función de distribución correspondiente.

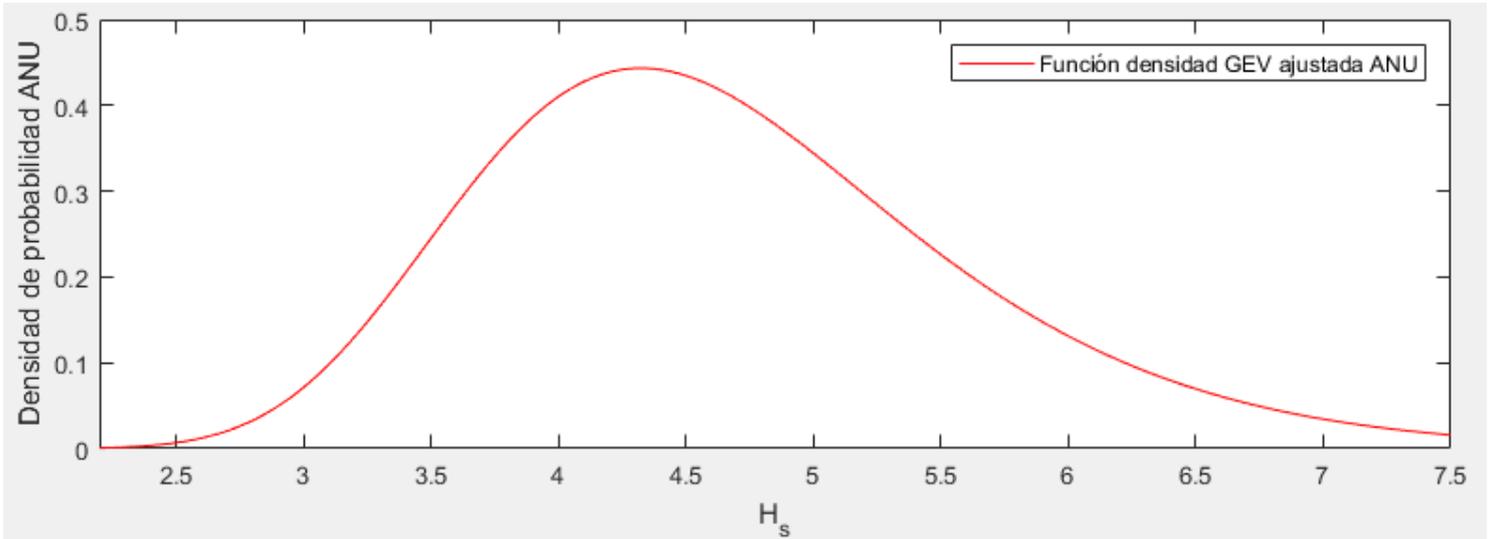


Figura 47. Función de densidad ajustada mediante la generalizada de valores extremos

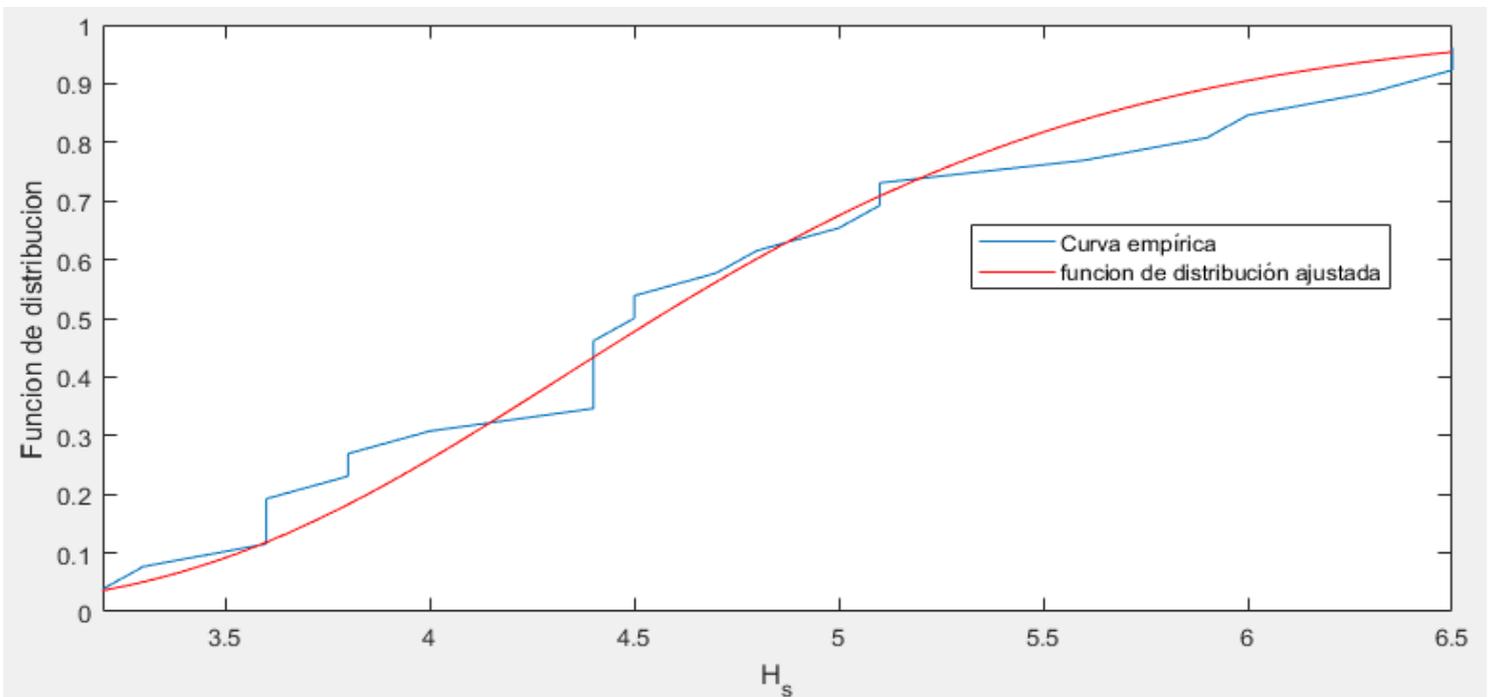


Figura 48. Función de distribución ajustada mediante la generalizada de valores extremos

Mediante esta función de distribución, y conocido el período de retorno, de 237,78 años, podríamos calcular la altura de ola significativa que nos interesa, en profundidades indefinidas, para después llegar a una altura de ola de cálculo a pie de dique.

Para la estimación usaremos la función de distribución GEV, cuya forma es la siguiente.

$$F_{GEV}(x) = Prob(X < x) = 1 - \frac{1}{T} = e^{-(1+C\frac{x-B}{A})^{\frac{-1}{C}}}$$

Los parámetros A , B y C , han sido utilizados a la hora de representar las gráficas, y toman los valores $A=0,8328$, $B=4,2519$ y $C=-0,0826$. Así, conocidos estos parámetros y el valor de T , la función queda como sigue.

$$\begin{aligned} F_{GEV}(x) = Prob(X < x) &= 1 - \frac{1}{238} \\ &= e^{-(1+(-0,0826)\frac{x-4,2519}{0,8328})^{\frac{-1}{-0,0826}}} \end{aligned}$$

Despejando x de la ecuación llegamos a la conclusión de que altura de ola significativa en profundidades indefinidas asociada a un período de retorno de 278 años toma el valor de 7,92 metros, siendo la probabilidad estimada de que las olas sean menores a dicho valor, de un 99,57%.

3.7 Cálculo del dique

3.7.1 Altura de ola máxima y propagación

Una vez conseguido el valor de altura de ola significativa en profundidades indefinidas se desea propagar esta ola hasta el punto del emplazamiento de la ampliación. Para ello se ha de tener en cuenta procesos como el de refracción o asomeramiento, los cuales agruparemos en un coeficiente de propagación, al cual se le asignará un valor de 0,8. Además, es obvio que hasta ahora se ha operado con alturas de ola significativa, mientras que nosotros buscamos un valor de ola máxima. Según muchas teorías, el factor de multiplicación necesario oscila entre 1,6 y 1,7. Por lo tanto, el valor de ola máxima propagada que se busca será:

$$H_{m\acute{a}x} = 7,92 * 0,8 * 1,7 = 10,77m$$

Hay que tener en cuenta un último punto, el de la reflexión del dique. Para ello, en primer lugar, es necesario tomar un valor de período T. Se puede decir que no existe una teoría determinada para obtener el periodo de onda de diseño ya que se trata de una labor compleja, que depende de la zona de estudio y de la distribución conjunta del periodo pico y la altura de ola. Una manera práctica de obtener un período dentro de un rango realista es estimar los siguientes límites inferior y superior.

$$\sqrt{\frac{130Hs}{g}} < T_p < \sqrt{\frac{280Hs}{g}}$$

El rango calculado es 9,16 s – 13,44 s, por lo que es aceptable considerar

un período T de valor 10 s. La ecuación con la que se obtendrá el valor de la altura de ola de cálculo es la ecuación del criterio de rotura.

$$\frac{H}{L} = \left[0,11 + 0,03 \frac{1 - Kr}{1 + Kr} \right] \tanh(k * h)$$

De los parámetros presentes en la ecuación aún son incógnitas los valores de Kr , L y h , ya que H es la altura de ola máxima propagada y h es la profundidad definida para la ejecución, de 13 metros. Se procede al cálculo de los mismos.

Se parte del período para obtener la frecuencia angular, la cual se necesitará para resolver la ecuación de dispersión.

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{10} = 0,628s^{-1}$$

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh); 0,395 = 9,81 * k * \tanh(k * 13)$$

La ecuación de dispersión se resolverá con iteraciones, hasta que el término de la izquierda sea igual al de la derecha. Dichas iteraciones quedan representadas en la siguiente tabla.

Nº de onda k	σ^2
0,06	0,38418
0,065	0,4389
0,063	0,4168
0,062	0,4059
0,061	0,395

Tabla 12. Valores del nº de onda iterados

Conocido el valor del nº de onda podemos obtener la longitud de onda L.

$$k = \frac{2\pi}{L} ; L = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{0,061} = 103 \text{ m}$$

Por último, asignando al coeficiente de reflexión un valor de 0,5, se puede resolver la ecuación. Se estimará si la ola máxima estimada rompe por fondo, observando los valores del término de la izquierda y de la derecha de la ecuación.

$$\frac{10,77}{103} = \left[0,11 + 0,03 \frac{1 - 0,5}{1 + 0,5} \right] \tanh(0,061 * 13)$$

$$0,104563 > 0,07921$$

El término de la izquierda, que incluye el valor de la altura de ola máxima, es mayor que el término de la derecha, por lo que la ola rompe por fondo. De este modo, el valor final de cálculo será el siguiente.

$$H_{calc} = 0,12 \tanh(k * h) * L$$

$$= 0,12 \tanh(0,061 * 13) * 103 = 8,16 \text{ m}$$

3.7.2 Parámetros de diseño del dique

A la hora de obtener los parámetros de diseño de la ampliación del dique es importante considerar los factores predominantes, que no son otros que aquellos que pueden provocar un modo de fallo o de parada

operativa en la infraestructura. Como agente principal estará presente el oleaje, ejerciendo su fuerza sobre los mantos y el espaldón. Se parte de una serie de parámetros ya conocidos, agrupados en la siguiente tabla.

Profundidad a pie de dique	$h=13$ m
Altura de ola máxima incidente	$H_{calc}=8,16$ m
Altura de ola significativa	$H_s=6,336$ m
Período	$T=10$ s
Peso específico del agua	$\gamma_w=1,025$ T/m ³
Peso específico del hormigón	$\gamma_c=2,35$ T/m ³
Peso específico de la escollera	$\gamma_e=2,65$ T/m ³

Tabla 13. Parámetros de importancia para el cálculo del dique

- **Extracción de piezas del manto principal**

La primera característica que se puede observar es que la altura de ola de cálculo es mayor que 6 metros, por lo que se recomienda el uso de pizas de hormigón cúbicas en el manto principal del dique en talud.

Se considera una cotangente del ángulo de inclinación de valor 1.5, lo que resulta en una pendiente de 0,66.

Al igual que se calculó la longitud de onda propagada, para el cálculo del tamaño de las piezas del manto principal es necesario el dato de longitud de onda sin propagar.

$$L_0 = \frac{g * T^2}{2\pi} = \frac{9,81 * 10^2}{2\pi} = 156,13 \text{ m}$$

Conocidos estos parámetros, se puede proceder a calcular los números de Iribarren a pie de dique y en profundidades indefinidas. Se tiene en cuenta también que el criterio de avería seleccionado es el de inicio de avería, en el que se considera que se mueven 3 piezas de la capa exterior de manto principal, teniendo este dos capas, y

siendo necesario que se desplacen las piezas al menos un diámetro o lado equivalente.

$$Ir = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_{\text{máx}}}{L_o}}} = \frac{0,66}{\sqrt{\frac{8,16}{156,13}}} = 2,9452$$

$$Iro = 2,654 * \tan \alpha = 2,654 * 0,66 = 1,7693$$

A partir de los números de Iribarren es posible el cálculo del parámetro ψ , teniendo en cuenta que, para el hormigón, los coeficientes A_w y B_w , que influyen en la ecuación, toman los valores de $A_w=0,06819$ y $B_w=-0,5148$.

$$\begin{aligned} \psi &= A_w(Ir - Iro) \exp(B_w(Ir - Iro)) \\ &= 0,06819(2,9452 \\ &\quad - 1,7693) \exp(-0,5148(2,9452 \\ &\quad - 1,7693)) = 0,0438 \end{aligned}$$

El último paso para llegar al peso de las piezas es resolver la ecuación de verificación, la cual, entre otros valores ya conocidos, depende de S_r , la relación entre el peso específico del hormigón y del agua, siendo esta $S_r=2,29$.

$$\begin{aligned} W &= \psi * H_{\text{máx}}^3 * \gamma_w * \frac{S_r}{(S_r - 1)^3} \\ &= 0,0438 * 8,16^3 * 1,025 * \frac{2,29}{(2,29 - 1)^3} \\ &= 24,38 \text{ Tn} \end{aligned}$$

El manto principal tendrá un espesor de 2 veces el lado de la pieza, por lo que se puede obtener como:

$$ep = 2 * \left(\frac{W}{\gamma_c}\right)^{\frac{1}{3}} = 4,36 m$$

- **Deslizamiento entre mantos**

Es necesario asegurar que hay estabilidad frente al deslizamiento, y, además, que se cumple la condición de filtro entre mantos, ya que estos tienen piezas de tamaños muy diferentes. Por lo tanto, se impone la condición de que el peso de las piezas de los sucesivos mantos será 15 veces inferior al de la capa superior, siendo las piezas de los mantos secundarios de escollera.

A. Primer manto secundario

$$Ws1 = \frac{W}{15} = 1,63 Tn \quad l1 = \left(\frac{Ws1}{\gamma_c}\right)^{\frac{1}{3}} = 0,88 m$$

$$ep1 = l1 * 2 = 1,77 m$$

B. Segundo manto secundario

$$Ws2 = \frac{Ws1}{15} = 108 kg \quad l2 = \left(\frac{Ws2}{\gamma_c}\right)^{\frac{1}{3}} = 0,18m$$

$$ep2 = l2 * 2 = 0,36m$$

Las piezas del núcleo están generalmente en un rango de pesos de entre los 25 y los 150 kg, por lo que, para nuestro caso, las piezas del segundo manto secundario entrarían en las del núcleo, y no sería necesario hacer la distinción entre estas dos capas. Sin embargo, por seguridad es recomendable al menos disponer de dos mantos secundarios, por lo que se colocaría una única capa de piezas de 300kg, con un espesor de 0,5m.

- **Rebase del francobordo**

Este punto, a diferencia de los dos anteriores, se estima en condiciones de operatividad, ya que el rebase se considera un modo de parada o ELO. Para calcularlo se necesita la operatividad, obtenida en la estimación del carácter operativo de la obra, de un valor del 99% en este caso, siendo así la probabilidad de que la altura de ola sea mayor que la altura de ola operativa de un 0,01.

$$Hop = \frac{Hs}{2^{0,5}} * (-\text{Ln}(0,01))^{0,5} = 9,65 \text{ m}$$

La ecuación de verificación con la que se obtiene el valor del francobordo depende del número de Iribarren, el cual habrá que calcular con la expresión que se encuentra en el punto 3.7.2, estimándose un valor de 2,22. También influirán los parámetros Au y Bu , los cuales para el hormigón toman los valores de $Au=1,05$ y $Bu=-0,67$.

$$Ru = Hop * (Au(1 - \exp(Bu * Ir))) = 8,45 \text{ m}$$

Normalmente se toma un valor de francobordo algo mayor al Ru , por lo que se determina un valor de $Fc=8,5 \text{ m}$ para esta dimensión.

- **Deslizamiento del espaldón**

El deslizamiento del espaldón tiene que ver con los dos tipos de presiones que provoca este sobre el dique. Por un lado, la presión dinámica, debida al impacto de la ola rota sobre el dique, y las presiones reflectivas, relacionadas con la acumulación de agua sobre el propio dique. Estas dos acciones no son simultáneas en el tiempo, por lo que se calculan de forma independiente.

Para comprobar la estabilidad frente al vuelco es necesario asignar una serie de parámetros al dique, principalmente relacionados con la geometría del espaldón.

Anchura de la berma	$B_c = e_p = 3,8 \text{ m}$
Cota de coronación de la berma	$A_c = 0,75 * H_s = 4,77 \text{ m}$
Cota de enrase del muelle	$F_m = 2 \text{ m}$
Cota de cimentación del espaldón	$A_e = 0,5 \text{ m}$
Coefficiente de seguridad	$CS = 1,2$
Coef. de rozamiento	$\mu = 0,6$
Botaolas	$B/3$

Tabla 14. Parámetros geométricos del dique

La ecuación de verificación para el deslizamiento incluye las fuerzas estabilizadoras y las desestabilizadoras, relacionándolas mediante el CS.

$$CS = \frac{\text{Fuerzas estabilizadoras}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}}$$

Es necesario conocer la formulación de las presiones que actúan sobre el dique. En primer lugar, se mostrará la formulación para la presión dinámica. Por un lado, el valor P_{so} es el máximo que se produce sobre la cara vertical del espaldón, mientras que la zona del espaldón que queda cubierta por la berma, sufrirá una presión proporcional a P_{so} , pero disminuida por un coeficiente λ .

$$P_{so} = \alpha_o * \rho * g * S_o \quad \lambda = 0,8 * \exp\left(-10,9 * \frac{B_c}{L}\right)$$

$$S_o = H_{max} \left(1 - \frac{A_c}{R_{umax}}\right)$$

$$\alpha_o = 2 * 1,45 * \left[\frac{Ru}{H} \cos\alpha \right]^2$$

Seguidamente se muestra la formulación para las presiones reflectivas, teniendo en cuenta que dependen de 3 parámetros que toman los valores a=0,362, b=0,069 y c=357,1.

$$Pr(z) = \mu * \rho * g(So + Ac - z)$$

$$\mu = a * \exp\left(c \left(\frac{H}{L} - b\right)^2\right)$$

La fuerza estabilizadora frente al deslizamiento será el peso, que se puede calcular de la siguiente forma.

$$Peso = \gamma_c \left((Fc - Fm) * \frac{B}{3} \right) + (Fm - Ae) * B - 0,5 * Pso * \lambda$$

Las fuerzas desestabilizadoras se calcularán para la acción dinámica y las acciones reflectivas con las ecuaciones siguientes.

$$FdesDinámica$$

$$= ((Fc - Ac) * Pso + (Ac - Ae) * Pso * \lambda)$$

$$FdesReflectiva$$

$$= ((\mu * g * \gamma_w * (So + Ac - Ae))/2)$$

Para cada caso, se sustituye en la ecuación de verificación

despejando el valor del ancho B, obteniendo un valor de B=7,2 m para las presiones dinámicas y un valor de B=3,52 m para las reflectivas, por lo que se usaría el mayor para dimensionar.

- **Vuelco del espaldón**

El cuarto mecanismo que se puede considerar como modo de fallo en el dique es el vuelco del espaldón. Tiene una ecuación de verificación muy similar a la del deslizamiento, con la salvedad de que en este caso se tomarán momentos estabilizadores y volcadores. La formulación presentada anteriormente es válida, siendo necesaria la inclusión de la distancia que existe entre el punto de aplicación de la fuerza y el punto de vuelco considerado, siendo este la esquina de la base del espaldón más cercana a la zona de sotamar.

El momento estabilizador será el que produce el peso.

$$MEst = \frac{5B}{6} \gamma_c \left((Fc - Fm) * \frac{B}{3} + (Fm - Ae) * B * 0,5B \right)$$

Los momentos desestabilizadores se calcularán para la acción dinámica y las acciones reflectivas con las ecuaciones siguientes.

$$\begin{aligned} MD_{Dinámico} &= ((Fc - Ac) * Pso) \\ &* \left(((Fc - Ac) * 0,5) + (Ac - Ae) \right) \\ &+ (Ac - Ae) * Pso * \lambda \left((Ac - Ae) * 0,5 \right) \\ &+ (0,5 * Pso * \lambda) * \frac{2B^2}{3} \end{aligned}$$

MDesReflectivo

$$= \left(\frac{\mu * g * \gamma_w * (S_o + A_c - A_e)}{2} \right) * \frac{F_c - A_e}{3} + (0,5 * P_{so} * \lambda) * \frac{2B^2}{3}$$

En Este caso, despejando el valor de B se obtienen unos valores de B=5,36 m para las presiones dinámicas y un valor de B=2,83 m para las reflectivas, siendo ambas menores que la estimada en el punto anterior, por lo que son irrelevantes.

Para definir el ancho B, hay que tener en cuenta que por la superficie del mismo circularán las diferentes máquinas, las cuales necesitarán de un ancho suficiente para la rodadura, de al menos 7 metros. Contando con la dimensión del botaolas, es una buena práctica fijar el ancho B en 10 m.

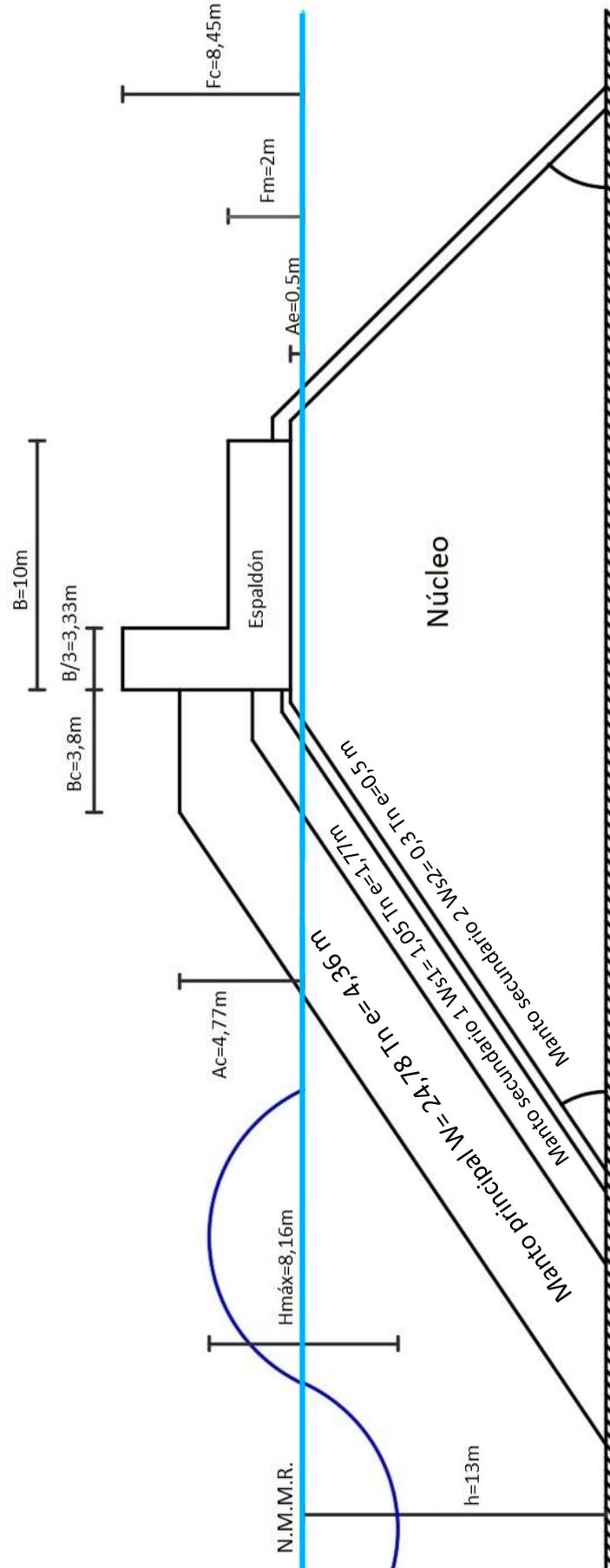


Figura 49. Ilustración 36. Esquema con los valores relevantes del dique y sus distintos elementos

4- CONCLUSIONES

Se puede afirmar que la energía undimotriz tiene una gran cantidad de puntos a favor, que la hacen una apuesta de futuro en términos de gasto energético se refiere. Por un lado, no genera contaminantes ni residuos, su impacto ambiental es muy leve, visual, sonoro o estructural. La energía es en cierto modo constante y predecible, siendo una fuente abundante e inagotable. Además, desde el punto de vista técnico es una fuente de energía muy segura, y existe la posibilidad de suministrar este tipo de energía a zonas de muy difícil acceso como pueden ser islas o barcos.

Los aspectos más negativos de la energía undimotriz son su instalación, mantenimiento y reparación, los cuales pueden llegar a ser muy costosos, debido principalmente a los daños estructurales producidos por la fuerza de las olas. Puede ser un sistema poco competitivo desde el punto de vista del coste, ya que este es bastante elevado. Por último, Se trata de una técnica que requiere de un gran desarrollo tecnológico, no disponible al alcance de todos los gobiernos.

Es probable que en un futuro no muy lejano la energía del mar en todas sus formas (undimotriz, mareomotriz...) pueda llegar a convertirse un nuevo sector productivo que se complemente con otras fuentes de energía renovables como la eólica o la solar, llegando a satisfacer todas las necesidades energéticas que existen en el mundo. Para ello es necesario que la tecnología esté bien desarrollada y los sistemas sean más eficaces,

Es importante que por parte de los gobiernos se observe que en este tipo de energía existe una nueva oportunidad para poder seguir invirtiendo en energías renovables, que a la larga se convertirá en una inversión para los ciudadanos ya que se trata de una industria que genera una cantidad

enorme de empleo y hará que en algún momento podamos liberarnos cada vez más de la dependencia que tenemos de los combustibles fósiles.



5- REFERENCIAS

- JOÃO CRUZ, *'Ocean wave energy'*
- GL GARRAD HASSAN, JOÃO CRUZ, *'Energía de los mares y los océanos'*
- ANTONIO MIGUEL GARCÍA MARÍN, ALEJANDRO ARIZA LÓPEZ *'Diseño de una obra de abrigo: Puerto de Marbella'*
- JORGE GUTIÉRREZ FUMERO, *'Aprovechamiento de la energía de las olas, energía undimotriz'*
- CARLOS RAMÍREZ ANGUITA, *'Estudio y análisis crítico de posibles soluciones a los problemas de erosión en los deltas mediterráneos'*
- S. RAGUNATHAN, *'The Wells air turbine for wave energy conversion'*
- ANTONIO MOÑINO FERRANDO et al, *'Procedimiento general y bases de cálculo en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias'*
- PABLO GALLEGO-CASILDA MARTOS, *'Proyecto de ampliación del puerto deportivo de Motril'*
- PABLO HOYOS ALCALDE, *'Proyecto de Central Undimotriz para Autoconsumo del Ayuntamiento de Comillas'*
- MIGUEL ORTEGA SÁNCHEZ, *'Infraestructuras portuarias'*
- MINISTERIO DE FOMENTO, *'ROM'*
- PEDRO FERNÁNDEZ DÍEZ, *'Energía del mar'*
- www.eve.eus/Proyectos-energeticos/Proyectos/Energia-Marina.aspx
- www.energiasgrupo1.blogspot.com
- www.caminoeuskadi.com/Profesion/Obras/central-oleaje-mutriku
- www.apmotril.com
- www.diariorenovables.com/2017/12/central-undimotriz-de-mutriku-analisis-datos-produccion-problemas.html

