



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Implantación a nivel nacional de la energía marina y diseño preliminar de un sistema de captación

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Pedro Pablo Sánchez Vázquez

DIRECTORES: Antón Cacabelos Reyes

**CURSO
ACADÉMICO:** 2015-2016

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Implantación a nivel nacional de la energía marina y diseño preliminar de un sistema de captación

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Los océanos ocupan tres cuartas partes de la Tierra. El agua que contienen los océanos está en permanente movimiento, lo que conlleva un continuo transporte de energía. Sin embargo, no son el recurso natural más aprovechado desde el punto de vista energético, ni a nivel mundial, ni a nivel nacional.

A lo largo del presente Trabajo de Fin de Grado, se analizarán los distintos tipos de energía marina. El estudio se centrará más en detalle en los sistemas de captación de energía marina a partir de la ola (energía undimotriz). También se examinará este tipo de recurso energético en la costa española, rica en esta clase de energía, y la posibilidad y viabilidad desde ciertos puntos de vista de instalar un dispositivo WEC (Wave Energy Converter) en la costa nacional. Finalmente, se realizará un análisis de un sistema de captación de energía de la ola atendiendo a diversos factores.

PALABRAS CLAVE

Energía undimotriz, energía marina, WEC, olamotriz, energía renovable

AGRADECIMIENTOS

Al tutor de este Trabajo de Fin de Grado, Antón Cacabelos, por hacerme descubrir un mundo completamente desconocido, el de la energía undimotriz y por soportar mis continuos quebraderos de cabeza.

A Rubén, por animarme a seguir siempre adelante aunque, en ocasiones, no fuese tarea fácil.

A mi madre, por insistir siempre en que trabajase.

A Elena, por confiar siempre en mí.

Contenido

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción histórica	7
1.2 Tipos de energía renovable	9
1.2.1 Energía solar	9
1.2.2 Energía eólica	10
1.2.3 Energía geotérmica	11
1.2.4 Energía hidráulica	12
1.2.5 Energía marina.....	12
1.3 Objetivos	12
1.4 Estructura del trabajo	13
2 Energía Marina	14
2.1 Tipos de energía	14
2.1.1 Energía de las mareas	14
a) Energía mareomotriz tipo barrera	15
b) Energía mareomotriz de turbinas aisladas	17
c) Hidroalas	18
2.1.2 Energía de las corrientes	19
2.1.3 Energía de las olas	21
a) Sistemas de rebosamiento (overtopping)	22
b) Atenuador.....	22
c) Convertidor de movimiento oscilante	23
d) Columna de agua oscilante	24
e) Oscilantes verticales.....	26
f) Diferencial de presión sumergido	27
g) Comba de oleaje.....	28
h) Masa rotatoria	28
2.1.4 Energía osmótica	29
2.1.5 Energía mareomotérmica.....	30
2.2 Zonas de experimentación en mar abierto	31
2.2.1 BIMEP	31

2.2.2 WaveHub	33
2.2.3 EMEC	34
2.2.4 PLOCAN	34
3 Desarrollo	36
3.1 Origen de la energía undimotriz.....	36
3.1.1 Parámetros de la ola	36
3.1.2 Potencial energético de la energía undimotriz	37
3.2 Recurso energético del oleaje en España	40
3.2.1 Método de obtención de datos	40
3.2.2 Resultados.....	41
3.3 Instalación de un sistema de energía undimotriz en España	47
3.3.1 Pasos para la instalación de una planta	47
3.3.2 Impacto medioambiental	47
3.3.3 Normativa nacional.....	48
3.3.4 En relación al recurso energético.....	49
3.3.5 Conexión a la red	53
3.3.6 Costes del uso de la energía de la ola	53
3.3.7 Instalación de un oscilante vertical en la costa Cantábrica.....	56
4 Diseño de un WEC	58
4.1.1 Método de diseño empleado	58
4.2 Simulación de movimiento realizado por una sola boya	59
4.2.1 Simulación de una boya en movimiento.....	59
4.2.2 Movimiento oscilatorio amortiguado	61
4.3 Simulación de un movimiento entre dos boyas	64
4.3.1 Diseño del sistema de captación	65
a) Diseño simple.....	65
b) Diseño con una estructura exterior.....	67
c) Diseño con estructura exterior y mástil de volumen variable	68
5 Conclusiones y Líneas Futuras.....	75
5.1 Conclusiones	75
5.2 Líneas futuras.....	76
6 Bibliografía.....	79
Anexo I: Teoría Lineal del Oleaje	83

Índice de Figuras

Figura 1-1 Rueda de agua de Filón	8
Figura 1-2 Eolípila de Herón. [1]	8
Figura 1-3 Placa termosolar [4].....	9
Figura 1-4 Placas fotovoltaicas [5].....	10
Figura 1-5 Esquema de una granja de captación de energía eólica marina por medio de aerogeneradores flotantes [8]	11
Figura 1-6 Parque eólico de London Array [11].	11
Figura 1-7 Presa de las Tres Gargantas (China) [12].	12
Figura 2-1 Diagrama de funcionamiento de la energía mareomotriz [13].	15
Figura 2-2 Una de las turbinas de Rance [15].	16
Figura 2-3 Detalle de la turbina de bulbo de la central de Sihwa [16].	16
Figura 2-4 Traslado de la turbina para su instalación en la Bahía de Fundy [20].	17
Figura 2-5 Diseño de las turbinas SeaGen de la empresa MTC [23].	18
Figura 2-6 Prototipo de DeltaStream [20]	18
Figura 2-7 Simulación de una hidroala para obtención de energía mareomotriz [24]	19
Figura 2-8 Principales corrientes oceánicas [25]	20
Figura 2-9 Diseño de cometa submarina [26]	21
Figura 2-10 Esquema de funcionamiento del Wavedragon [33].	22
Figura 2-11 Pelamis [24]	23
Figura 2-12 Esquema de funcionamiento de un convertidor de movimiento oscilante [36]	23
Figura 2-13 Oyster 800 [20]	24
Figura 2-14 Diseño de tecnología CAO. Fuente: Wave Power in Europe [38]	25
Figura 2-15 Planta de captación de energía undimotriz en Mutriku [39]	25
Figura 2-16 Turbina Wells [40].	26
Figura 2-17 PowerBuoy instalada en Santoña [41].	26
Figura 2-18 Simulación de un diferencial de presión [24]	27
Figura 2-19 Esquema de funcionamiento del APC-PISYS [42]	27
Figura 2-20 Simulación de una comba de oleaje [24].	28
Figura 2-21 Simulación de una masa rotatoria [24]	28
Figura 2-22 Principio de funcionamiento de la energía osmótica [43]	29
Figura 2-23 Esquema de funcionamiento de una planta de energía maremotérmica [44]	30
Figura 2-24 Recurso energético mundial de las diversas formas de energía del mar	31
Figura 2-25 Localización de la infraestructura BIMEP [45].	32

Figura 2-26 Diagrama de la infraestructura BIMEP. [45].....	33
Figura 2-27 Esquema del área WaveHub [46]	34
Figura 3-1 Características de una onda sinusoidal pura [17].	36
Figura 3-2 Espectro energético para un océano en completo desarrollo [17]	38
Figura 3-3 Energía de la ola en función de la fuente generadora [17]	39
Figura 3-4 Comportamiento de las partículas de agua [17]	40
Figura 3-5 Malla de cálculo para el Cantábrico [47].....	42
Figura 3-6 Potencia media en la malla de cálculo G01 (kW/m) [47].....	42
Figura 3-7 Potencia media en la malla de cálculo G02 (kW/m) [47].....	42
Figura 3-8 Potencia media en la malla de cálculo G03 (kW/m) [47].....	43
Figura 3-9 Potencia media en la malla de cálculo G04 (kW/m) [47].....	43
Figura 3-10 Malla de cálculo de las Islas Canarias [47]	44
Figura 3-11 Potencia media en la malla de cálculo G09 (kW/m) [47].....	44
Figura 3-12 Potencia media en la malla de cálculo G10 (kW/m) [47].....	45
Figura 3-13 Potencia media en la malla de cálculo G11 (kW/m) [47].....	45
Figura 3-14 Potencia media en la malla de cálculo G12 (kW/m) [47].....	45
Figura 3-15 Potencia media en la malla de cálculo G13 (kW/m) [47].....	46
Figura 3-16 Potencia media en la malla de cálculo G14 (kW/m) [47].....	46
Figura 3-17 Distribución mundial media del recurso energético olamotriz (kW/m)	50
Figura 3-18 Distribución europea media del recurso energético olamotriz (kW/m) [36].....	50
Figura 3-19 Situación de la boya de obtención de datos meteorológicos Gijón II.	51
Figura 3-20 Detalle de carta náutica de la situación de la boya [51]	51
Figura 3-21 Altura significativa de la ola (m) [36]	52
Figura 3-22 Período significativo de la ola (s) [36]	52
Figura 3-23 Ángulo de dirección de la ola [36]	52
Figura 3-24 Potencia transmitida por la ola [36].....	52
Figura 4-1 Software de simulación CAE Siemens NX	58
Figura 4-2 Seis grados de libertad. [58]	59
Figura 4-3 Esquema de una boya experimentando un movimiento oscilatorio amortiguado	62
Figura 4-4 Simulación de una boya en Siemens NX.....	63
Figura 4-5 Vista de alzado de la simulación en Siemens NX	64
Figura 4-6 Boya con cremallera	65
Figura 4-7 Boya cuyo cometido es alojar la rueda dentada	66
Figura 4-8 Rueda dentada.....	66
Figura 4-9 Ensamblado de las dos boyas	66
Figura 4-10 Flotador compuesto de cuatro boyas unidas entre sí	67

Figura 4-11 Boya central o mástil	67
Figura 4-12 Ensamblados flotadores-mástil.....	68
Figura 4-13 Movimiento del mástil cuando se encuentra en el valle de la ola	69
Figura 4-14 Movimiento de la ola cuando se encuentra en la cresta de la ola	69
Figura 4-15 Boya central o mástil	69
Figura 4-16 Detalle del tope instalado	70
Figura 4-17 Ensamblado de flotadores y mástil hueco	70
Figura 4-18 Esquema de la boya en estado de reposo.....	70
Figura 4-19 Esquema de las fuerzas de peso y empuje que actúan sobre el cuerpo	73
Figura 0-1 Superposición de oleaje oceánico. [38]	85
Figura 0-2 Desplazamiento de las partículas de agua en aguas poco profundas y en aguas profundas. [48]	87

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Comparación de sistemas de energía marina [36]	31
Tabla 3-1 Clasificación del mar en función de la altura de las olas [17].	37
Tabla 3-2 Coste (LCE, c€/kWh) teórico y real de electricidad en instalaciones de energías del mar.	54
Tabla 3-3 Distribución del CAPEX (Capital Expenditures) desglosado de planta undimotriz y de corriente[36].....	55
Tabla 3-4 Evolución del LCE por años	55
Tabla 3-5 Potencia media por meses (kW/m)	57
Tabla 3-6 Parámetros de la <i>PowerBuoy</i> [52].....	57
Tabla 4-1 Características de los diferentes modelos hidrodinámicos [53].....	59
Tabla 4-2 Parámetros de la boya y de la ola [55]	63
Tabla 5-1 Evolución de dispositivos de energía eólica y undimotriz en Europa según estimación de <i>The Carbon Trust</i>	76
Tabla 0-1 Soluciones de la Teoría de Airy	88

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción histórica

El concepto de energía, desde un punto de vista puro y físico, es la capacidad de realizar un trabajo. También se puede definir como el poder '*utilizable*', la entidad natural fundamental transferida entre partes o cuerpos de un sistema.

Desde el comienzo de la raza, el ser humano ha hecho uso los medios que la madre naturaleza le ha proporcionado, aprovechándolos. Así pues, múltiples fuentes de energía han sido empleadas por las sociedades humanas a lo largo de los años. Aunque pueda parecer de pura simpleza, el uso de la fuerza humana ya se podría considerar uso de energía. Según la civilización humana tomaba forma, el hombre fue capaz de expandir el uso de la energía, como se podría ilustrar con el uso de madera como combustible (hace 350.000 años). El hombre ganaba en inteligencia, dando con otras formas de obtener energía. Fue así, con la domesticación, cuando aparecieron los animales de tiro o de carga (hace 10.000 años).

Según historiadores, resulta imposible establecer el momento exacto en que se comenzó a hacer uso de energías renovables. Sí se conoce, no obstante, que las aplicaciones de energía renovable más arcaicas se situarían en el ámbito del transporte, y más concretamente en el de la navegación a vela, descubriéndose, de este modo, la energía eólica (hace 5500 años). Posteriormente, con la aparición de los molinos de viento (hace 2500 años, según historiadores), dicha forma de energía quedaba asentada. Paralelamente en el tiempo, aparecían los molinos de agua, dando lugar a lo que actualmente se conoce como energía hidráulica. Otra fuente de energía que ganaría fuerza con el paso de los años es la energía solar, pues el diseño de los edificios daría lugar al mejor aprovechamiento de los rayos de sol. Fue Arquímedes en la época de la Antigua Grecia, quien escribió un libro sobre el uso de espejos, que podrían ser utilizados para inflamar altares. Además, se cree que en la Antigua Grecia ya se usaba el flujo de aire caliente para construir pequeños objetos mecánicos.

Fue otro griego, Ktesibios quien usaría el poder que el agua ejerce para diseñar un reloj (250 a.C.). Con Filón de Bizancio, en el siglo 3 a.C. apareció la primera forma de aprovechamiento del movimiento del agua como tal, engendrando la rueda de agua.

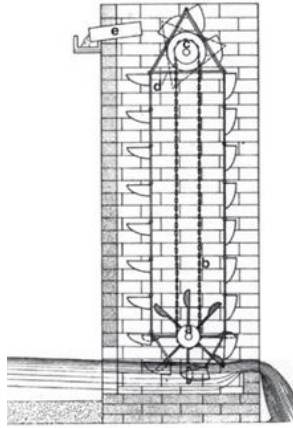


Figura 1-1 Rueda de agua de Filón

También aprovecharon los medios que la naturaleza les proporcionaba, siendo Herón de Alejandría el creador de la más primitiva máquina de vapor (también conocida como eolípila) de la historia. Roma también aportó su grano de arena en el entorno del aprovechamiento energético. Fueron ellos quienes utilizaron el poder humano para fabricar tornos de alfarero y bombas de agua.

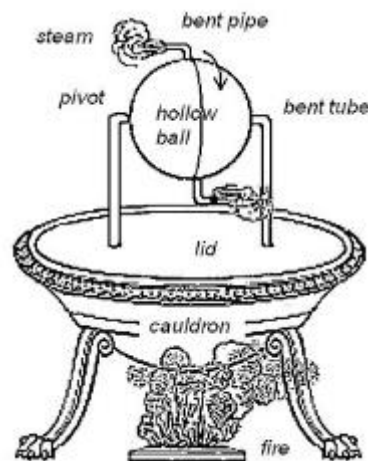


Figura 1-2 Eolípila de Herón. [1]

No obstante, el combustible fósil no es un medio de energía infinito. Nada más lejos de la realidad. A mediados de los años 70, se produjo una gran disminución de las reservas de petróleo. El hombre, cauteloso y conocedor de que los combustibles fósiles son limitados, resucitó la energía renovable. Este hecho, sumado a la concienciación por parte de la ciencia del efecto invernadero y de las consecuencias que éste podría acarrear, provocó que volviesen a emerger las energías renovables. A este renacimiento de la energía limpia, hay que añadirle el avance tecnológico que ayuda e innova en el ámbito de las energías renovables. Este avance da lugar a que esta ciencia se considere hoy en día un proyecto viable. [2]

1.2 Tipos de energía renovable

Se conocen diversas formas de energía, siendo las más acudidas y eficaces las siguientes: solar, eólica, geotérmica, hidráulica y marina, así como sus derivadas.

1.2.1 Energía solar

La energía solar se divide principalmente en energía térmica y energía fotovoltaica, siendo la primera la más aprovechada. La energía solar térmica, también denominada termosolar, se basa en la concentración de la energía del sol para obtener energía térmica. Así pues, el panel solar capta los rayos del sol, absorbiendo su energía en forma de calor. A través del panel se hace pasar un fluido transfiriéndose la energía calorífica de un fluido a otro. Además, este sistema está dotado de un sistema de acumulación constituido por un depósito que almacena el agua caliente hasta que se precise su uso [3]. Este tipo de energía es aplicada principalmente a nivel usuario quien, mediante la instalación de paneles térmicos en los tejados de sus casas, es capaz de aprovechar los rayos de sol para calentar agua de consumo, radiadores, etc.

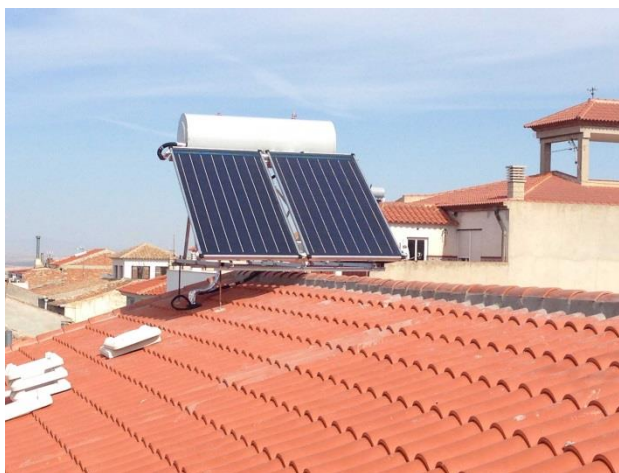


Figura 1-3 Placa termosolar [4]

Por otro lado, se encuentra la energía fotovoltaica, que se ha convertido en la tercera fuente de energía renovable más importante en cuanto a capacidad, tras las energías hidroeléctrica y eólica. En cuanto a su funcionamiento, reside en el silicio, material del que están compuestas. El silicio se dopa, o lo que es lo mismo, se dota de un defecto de electrones por un lado, y por el otro de un exceso de electrones, dando lugar a una tensión eléctrica. Esto se consigue mediante la colocación, en el momento de la fabricación de las placas, de fósforo (que posee más electrones que el silicio) para la capa expuesta al sol, mientras que en la capa inferior se agrega oro, en el que los átomos poseen menos electrones. De esta forma, cuando los rayos de sol chocan con la placa fotovoltaica, los electrones del silicio comenzarán a circular obteniéndose como resultado corriente eléctrica.



Figura 1-4 Placas fotovoltaicas [5]

Existe además, en este ámbito de energía solar, la termoelectrica, que concentra la energía procedente del Sol, con el fin de alcanzar medias y altas temperaturas que permitan la generación de energía eléctrica [6]. Si bien es cierto que la termoelectrica se encontrará al alza en los próximos años, actualmente no está demasiado desarrollada (estudios la sitúan entre la más competitiva para el año 2050 [7]).

1.2.2 Energía eólica

Por otro lado, se encuentra la energía eólica. Como ya se expuso anteriormente, dicha forma de energía es uno de los recursos más utilizados por nuestros antepasados. La eólica es una de las formas de energía más ecológicas, maduras y respetuosas con el medio ambiente, además de ser una de las más acudidas por los países. Dicha forma de energía utiliza la fuerza del viento para generar electricidad mediante el movimiento de aerogeneradores. Estos mueven una turbina, que transforma la energía cinética del viento en mecánica. Así pues, la cantidad de energía aprovechada dependerá directamente del tamaño del aparato.

Es importante diferenciar los dos tipos de energía eólica que se pueden hallar: la eólica terrestre y la marina. Como es lógico pensar, la energía eólica terrestre es aquella cuyos aerogeneradores se sitúan en tierra. De las dos, es la que más desarrollada se encuentra. En cuanto a la energía eólica marina, actualmente se encuentra en pleno crecimiento. Se denomina energía eólica marina toda aquella en la que sus elementos principales se encuentran instalados en el mar. Su principal ventaja frente a la eólica terrestre es el hecho de que, en el mar, los vientos son más constantes y predecibles en cuanto a dirección e intensidad. Posee, no obstante, una serie de restricciones respecto a la terrestre: la energía obtenida en medio del mar hay que transportarla a tierra, lo que supone la costosa instalación de cableado submarino. Otra traba que presenta la energía eólica marina es el propio asentamiento de los molinos, pues tan sólo es rentable situarlos en zonas de poco fondo, o lo que es lo mismo, cerca de costa, afectando a la misma y al medio marino. Otros proyectos, más ambiciosos e innovadores van tomando forma en este entorno: los aerogeneradores flotantes. Empresas como *Statoil* están llevando a cabo un proyecto para instalar los mismos en la costa de Escocia. La producción de energía se espera para el año 2017 [8].



Figura 1-5 Esquema de una granja de captación de energía eólica marina por medio de aerogeneradores flotantes [8]

Actualmente, la energía eólica está presente en multitud de países. A finales de 2008, en la Unión Europea había instalados 65 GW de capacidad de energía eólica que producían 142 TWh de electricidad y que permitían satisfacer el 4,2% de la demanda de electricidad de la UE [9]. España, además de líder en este tipo de aprovechamiento de energía (situada en tercer lugar, por detrás de Estados Unidos y Alemania) [10], se puede considerar una de las naciones pioneras del ámbito.



Figura 1-6 Parque eólico de London Array [11].

1.2.3 Energía geotérmica

En cuanto a la energía geotérmica, procede del interior de la Tierra. Esta forma de energía se obtiene a partir del aprovechamiento de la desintegración de elementos isótopos radiactivos, de la variación diferencial de posición entre las capas que conforman el planeta, así como del calor latente de la cristalización del núcleo externo. Este tipo de energía hace pasar vapor de agua procedente del subsuelo y lo hace circular por intercambiadores de calor. Cuando se trata de temperaturas elevadas (100–150°C), los recursos se aprovechan en electricidad eléctrica. Cuando no alcanza tan altas temperaturas, sus principales aplicaciones son a nivel industrial, servicio y residencial. En caso de temperaturas por debajo de los 25°C, la única posibilidad de aprovechamiento reside en climatización y obtención de agua caliente.

1.2.4 Energía hidráulica

La energía hidráulica es aquella que aprovecha la caída y velocidad del agua (energía potencial o cinética) para generar energía eléctrica. Así pues, se utilizan recursos como cataratas, ríos o simplemente se construyen presas para tal fin. Así como la eólica, la energía hidroeléctrica constituye una de las primeras formas de obtención de energía por medio de recursos renovables por parte del ser humano. Buen ejemplo de energía hidráulica lo ilustra la presa de las Tres Gargantas (la más grande del mundo), construida en el río Yangtze, en China. Puede llegar a producir casi 100 TWh de electricidad.



Figura 1-7 Presa de las Tres Gargantas (China) [12].

1.2.5 Energía marina

El agua cubre tres cuartas partes del planeta. Como bien es sabido, el agua de los océanos se encuentra en permanente movimiento, lo que la convierte en una fuente inagotable de energía. A la energía que hace uso del agua de mar se le denomina energía marina, siendo múltiples las formas que existen de explotar. A lo largo de este TFG se analizarán dichas formas de obtener energía del medio marino.

La Península Ibérica y los dos archipiélagos de los que España se compone están enclavados en una importante y sustancial posición desde el punto de vista de la energía marina, y es que, en total, suma 7880 kilómetros de costa. España, por lo tanto, dispone de recurso viable de gran calidad para su explotación. De entre todas las formas de energía marina, se ha escogido la energía undimotriz por ser la más significativa, no sólo a nivel nacional, sino también a nivel continental y mundial, pese a no ser la más apelada.

1.3 Objetivos

A lo largo del presente Trabajo de Fin de Grado, se realiza un extenso y profundo análisis de los distintos tipos de energía marina. Se profundizará especialmente en la energía undimotriz, detallando cada tipo de dispositivo con sus características principales.

Otra intención para el desarrollo de este TFG es analizar la energía inherente a la ola desde un punto de vista analítico, teniendo siempre en cuenta el propósito de los dispositivos de captación de energía undimotriz.

Se confía, también, poder analizar el recurso energético undimotriz que caracteriza el mar que baña el Estado español, pudiendo y esperando definir una zona óptima para la instalación de un WEC. Asimismo, otra de las expectativas que se guardan para este TFG es desarrollar un prototipo preliminar de WEC, con los principales parámetros que lo definen.

La principal empresa y aspiración, finalmente, de este TFG es razonar o determinar si la energía undimotriz es viable en comparación con otras energías renovables más demandadas en la actualidad.

1.4 Estructura del trabajo

El presente Trabajo de Fin de Grado está estructurado de forma que, en primer lugar, se tratan, comentan y definen los distintos tipos de sistemas de energía marina (2: *Energía marina*).

A continuación, en el punto 3: *Desarrollo* se procede a estudiar la energía de la ola desde un punto de vista analítico. A lo largo de este punto 3, se profundiza en el origen de la ola, sus características básicas, así como la energía que transporta y el recurso energético de la costa nacional. Finalmente, se estudia la posibilidad de instalar un dispositivo WEC en la costa española.

En el punto 4: *Diseño de un WEC*, se lleva a cabo la parametrización preliminar de un dispositivo de captación de energía marina. En este punto se comienza con el diseño más básico (simulando el movimiento de una sola boya), y se realizan diseños más complejos como lo es el de un mástil introducido en una estructura para la obtención de energía undimotriz a partir del movimiento relativo de éstos.

Finalmente, en el punto 5: *Conclusiones y líneas futuras*, se realiza una autoevaluación acerca de la efectividad y viabilidad de instalar un dispositivo WEC en la costa española. También se aconseja una línea a seguir para futuros trabajos o estudios en el mismo ámbito que este Trabajo de Fin de Grado.

2 ENERGÍA MARINA

El mar es una de las fuentes potenciales de obtención de energía más grande que existe (ocupa más de la mitad del globo terráqueo) desde el aprovechamiento de parques eólicos *off-shore* hasta el aprovechamiento de las mareas o de las olas. No obstante, actualmente no existe un desarrollo tecnológico adecuado a la gran cantidad de energía que de él se puede obtener.

Dentro de las Energías del Mar, existen tecnologías claramente diferenciadas, en función de la forma de aprovechamiento energético: energía de las mareas o mareomotriz, energía de las corrientes, energías de las olas o undimotriz, energía del gradiente salino (osmótica) y energía maremotérmica.

2.1 Tipos de energía

2.1.1 Energía de las mareas

La atracción gravitatoria de la Luna y el Sol, sumada al movimiento de rotación de la Tierra provocan lo que se conoce comúnmente como mareas. Dichas mareas dan lugar a que el nivel del mar aumente y disminuya a intervalos regulares. La amplitud de mareas, o lo que es lo mismo, la diferencia de niveles entre el más alto (pleamar) el más bajo (bajamar), suele ser pequeña en mitad del mar, pero puede alcanzar muchos metros en algunos lugares como, por ejemplo, la bahía de Fundy (Canadá), en la que llega a alcanzar hasta 20 metros. Este movimiento vertical acarrea un movimiento horizontal de grandes masas de agua: la corriente de marea.

Si se coloca un dique en el mar y se cierran las compuertas, llegará un punto en el que debido a las mareas, los niveles de agua a un lado y a otro del dique serán distintos. Expresado de otra forma, el agua quedará almacenada a un lado del dique. Ahora bien, si se abren las compuertas circulando el agua del lado donde la cantidad de agua es mayor al lado donde es menor, y se hace pasar por los álabes de una turbina, ésta aprovechará la energía cinética intrínseca de la masa de agua, convirtiéndola en energía mecánica (y más tarde en energía eléctrica). Para que la energía mareomotriz sea rentable, es necesario que haya, entre pleamar y bajamar, al menos 5 metros de altura de marea. Además, es requisito imprescindible que la bahía que acondicione el dique sea apropiada para la captación de energía. La energía mareomotriz y la hidráulica tienen un origen diferente, ya que la primera se produce como consecuencia de atracción gravitacional del Sol, y principalmente de la Luna, y la segunda se origina con el ciclo hidrológico. No obstante, respecto a la tecnología del aprovechamiento, podría decirse que ambas presentan una gran similitud.

La potencia asociada a las mareas se estima del orden de 3 TW. Sin embargo, para el aprovechamiento eficaz de la energía mareomotriz es necesario que la amplitud de las mareas sea de, al menos, cinco metros y que exista una bahía apropiada para la recogida y almacenamiento del agua en las pleamares. Además, la potencia disponible en las costas se reduce a valores del orden de 1 TW, ya que, teniendo en cuenta las pequeñas amplitudes de las mareas comparadas con los saltos de los aprovechamientos hidroeléctricos, es necesario disponer de grandes volúmenes de agua y, por lo tanto, se precisan grandes desarrollos en las anchuras de los diques. Estas condiciones se reúnen en pocos lugares en el mundo.

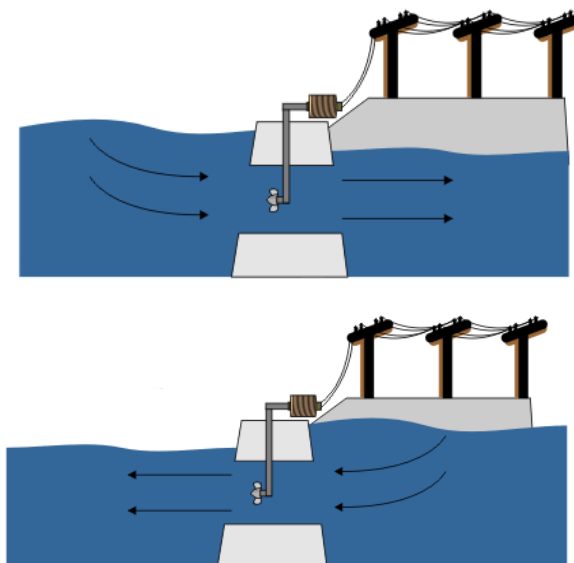


Figura 2-1 Diagrama de funcionamiento de la energía mareomotriz [13].

a) *Energía mareomotriz tipo barrera*

En el ámbito de las turbinas insertadas dentro de diques, Francia es un país pionero. En 1966 en el estuario de Rance, situado en la Bretaña francesa, nació la primera forma de aprovechamiento de la energía mareomotriz. Con 20 km de longitud y 750 metros de largo, sumado a las grandes amplitudes de marea (hasta 14 metros) que existen en este lugar, La Rance es un lugar propicio para la obtención de este tipo de energía. El dique ocupa los 750 metros de largo que tiene el estuario de anchura. A lo largo del dique, se sitúan 24 turbinas de bulbo de 10 MW cada una, capaces de producir electricidad. Las turbinas utilizadas tienen un diámetro de 5,35 m. La producción de energía, además, trabaja a doble sentido. Es decir, tanto en marea llenante (cuando aumenta el nivel del mar en el estuario) como en marea vaciante (cuando disminuye la altura de marea). La fábrica mareomotriz de La Rance produce 640 GWh de energía al año, lo que correspondería al consumo de una ciudad de 300.000 habitantes [14].

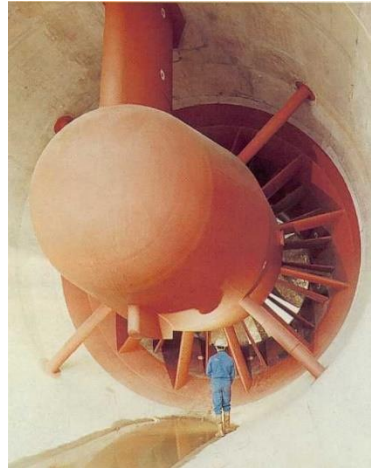


Figura 2-2 Una de las turbinas de Rance [15].

Otro caso más actual, relativo al aprovechamiento de la energía mareomotriz con la ayuda de turbinas tipo barrera, es el de Corea del Sur. La central mareomotriz de Shiwa es la más potente del mundo. Posee una capacidad total de 254 MW, con lo que supera la energía que la de La Rance es capaz de obtener (240MW), poniéndose así a la cabeza en este tipo de energías. Su construcción comenzó en 1994 y finalizó en 2011. El dique está compuesto por 10 turbinas de bulbo de 26 MW cada una y 7,5 metros de diámetro. Las mareas en este lugar son de unos 6 metros de media, pero pueden llegar a alcanzar hasta 8 metros durante las mareas vivas (aquellas que se producen cuando Sol, Luna y Tierra están alineados). La producción anual de electricidad es de 540 GWh, siendo capaz de abastecer a una población de 500.000 habitantes durante un año. En comparación con la de Rance, que posee 22 km² de cuenca marina, en el caso coreano posee 56 km² [16].

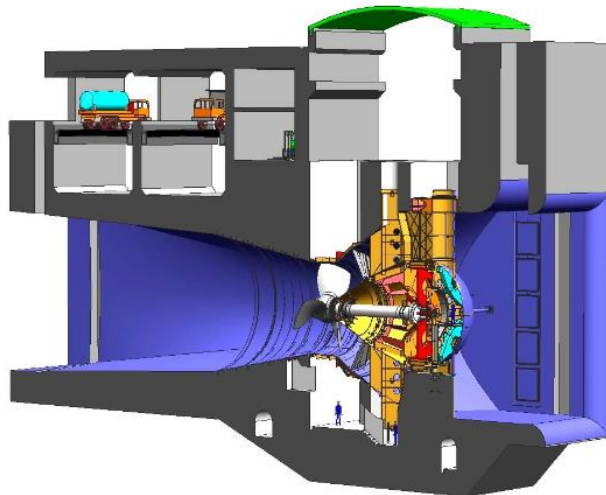


Figura 2-3 Detalle de la turbina de bulbo de la central de Sihwa [16].

La principal desventaja que presenta el aprovechamiento de la energía de las mareas mediante centrales de tipo barrera, es que origina impactos considerables en el medioambiente, razón por la que, recientemente, se han investigado métodos de explotación de la energía mareomotriz basados en el aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes marinas originadas por las mareas (corriente de marea) [17].

b) *Energía mareomotriz de turbinas aisladas*

El funcionamiento de este tipo de turbinas es similar al de los aerogeneradores eólicos, pero, en este caso, dimensionados para rotar sumergidos en el agua. Las turbinas se emplazan en el fondo del mar o ligeramente sumergidas. Un dato a tener en cuenta a la hora de comparar la mareomotriz con la energía eólica es que estos sistemas trabajan cosechando energía procedente de una masa de agua, que es 800 veces más densa que el aire, transportando mucha más energía [18]. Esto implica que los mecanismos han de ser más robustos que para el caso del aire con la finalidad de soportar mayores esfuerzos. La cantidad de movimiento que el agua es capaz de transportar quedará plasmada con un ejemplo que se tratará más adelante.

Respecto a este tipo de energía marina, se pueden encontrar multitud de proyectos llevados a cabo. Uno de ellos trata sobre un tema ya nombrado: las mareas en la Bahía de Fundy, situada al este de Canadá. Conectada al Golfo de Maine en el Océano Atlántico, sus fuertes variaciones de altura de marea pueden llegar a provocar corrientes de marea de hasta 18 km/h. Con sus mareas, la masa de agua en movimiento es mayor que el flujo combinado de todos los ríos del mundo. Esto hace que la Bahía de Fundy sea uno de los lugares más idóneos en la Tierra para la obtención de energía a partir de las corrientes de marea. Se estima que con las turbinas se puede obtener hasta 10 GW de potencia, lo que equivale, aproximadamente, al 15% de la demanda anual de electricidad de Canadá. Es, por lo tanto, fácil pensar que, pudiendo colmar la reclama energética de un país tan grande, resulte un proyecto viable [19]. Las turbinas empleadas en este caso fueron resultado de un consorcio liderado por la empresa *OpenHydro*, con base en Irlanda.



Figura 2-4 Traslado de la turbina para su instalación en la Bahía de Fundy [20].

No obstante, una vez instalada la turbina y puesta a prueba, se subió a la superficie completamente destrozada debido a las fuertes corrientes de marea. Aún hoy día las grandes empresas de la ingeniería de las corrientes marinas siguen pensando qué tipo de turbina sería la idónea para tan contundentes corrientes de marea [21]. Por esta razón, Fundy Ocean Research Center for Energy (FORCE), contrató MTC (una compañía de Atlantis) cuya función no era otra que dar con una turbina capaz de aprovechar la energía de la corriente y suficientemente robusta como para soportar la fuerza de la misma. Así pues, será MTC quien colocará sus turbinas *SeaGen* en la cuenca de Minas [22].

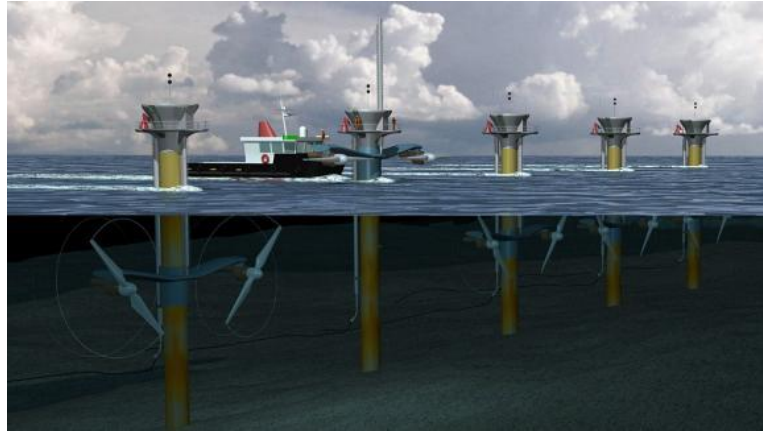


Figura 2-5 Diseño de las turbinas SeaGen de la empresa MTC [23].

También Europa tiene instaladas a lo largo de sus costas turbinas aisladas para la obtención de energía mareomotriz. Es el caso de Raz Blanchard, al norte de Francia. Será la empresa *Alstom* quien proporcione el equipamiento necesario para producir energía. Se espera que para el año 2017 tanto turbinas como cables submarinos estén instalados y listos para producir energía. Las turbinas empleadas serán *Four Oceade 18* capaces de producir 1,4 MW.

En Gales, por otro lado, y más concretamente en Pembrokeshire, se encuentra en fase experimental la instalación de turbinas para el futuro aprovechamiento de la energía de las mareas. Actualmente, la compañía TEL (Tidal Energy Ltd) tiene instalada una turbina tipo *DeltaStream* para un período de prueba que durará 12 meses. Este proyecto se usará para demostrar la capacidad de dicha turbina para generar energía. También servirá para ver qué impacto tiene el asentamiento de la turbina en el medio que la rodea.



Figura 2-6 Prototipo de DeltaStream [20]

c) *Hidroalas*

Otros tipos de turbina se han adaptado a este sistema de captación de energía marina. Así pues, se investiga el uso de dispositivos de extracción de energía mediante el uso de hidroalas en el ámbito de la capacidad de las mismas para absorber energía cinética. Fue el movimiento de algunos animales como pájaros o peces el que inspiró a los científicos a investigar el uso de las hidroalas en el ámbito de las energías renovables, debido al gran y exclusivo comportamiento que muestran. El mecanismo consiste

en un hidrodensizador oscilante que opera mediante una paleta hidrodinámica unida a un brazo que también oscila mediante un eje mecánico. El movimiento lo produce el paso de la masa de agua dando lugar a la subida y bajada de la paleta. Sin embargo, este sistema se encuentra aún en fase de desarrollo.

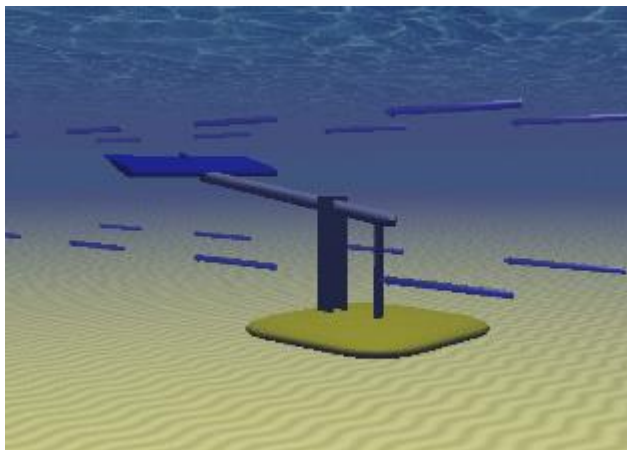


Figura 2-7 Simulación de una hidroala para obtención de energía mareomotriz [24]

2.1.2 Energía de las corrientes

Antes de estudiar en qué campos se aprovecha la energía transportada por las corrientes, debe definirse qué es una corriente y qué la origina. Las corrientes describen el movimiento del agua de un punto a otro. Suelen medirse en metros por segundo o en nudos ($1 \text{ nudo} \approx 1,85 \text{ km/h}$). Las corrientes oceánicas pueden ser originadas por diversos fenómenos:

- El primero de ellos es el ya mencionado efecto de las mareas. Las mareas crean corrientes en los océanos que son mayores cerca de las costas, bahías y estuarios. Estas son llamadas corrientes de marea. Son muy características ya que pueden ser predichas.
- El viento provoca corrientes cerca de la superficie oceánica. Cerca de las zonas costeras los vientos tienden a crear corrientes a una escala más localizada, pudiendo dar lugar a fenómenos como el de surgencia costera, por el cual el agua fría profunda sube hasta la superficie. En un océano más global, los vientos (más constantes que en la costa), conducen corrientes que hacen circular las masas de agua durante miles de millas a través de las cuencas oceánicas.
- La circulación termohalina (CTH), es un proceso marcado por las diferencias de densidad del agua debido a las variaciones de temperatura y salinidad en diferentes partes del océano. Las corrientes creadas por la circulación termohalina tienen lugar tanto a nivel profundo como somero y son de mucha menor intensidad que las creadas por las mareas o por el viento.

Las corrientes, además, afectan el clima de la Tierra transportando agua caliente del Ecuador y agua fría de los polos alrededor del planeta.



Multitud de países se encuentran inmersos en este tipo de tecnología, si bien es cierto que hoy en día no hay ninguna turbina marina para obtención de energía de la corriente instalada. Países como Japón, China, Estados Unidos o incluso países de la Unión Europea están interesados en obtener beneficios de las corrientes oceánicas.

Deep Green sería la única planta de obtención de energía capaz de producir electricidad con intensidades de corriente entre 1,2 y 2,5 m/s y profundidades entre 60 y 120 metros. Además, este tipo de construcción no tendría ningún impacto visual en el medio, ya que trabajaría a, al menos, 15 metros por debajo de la superficie

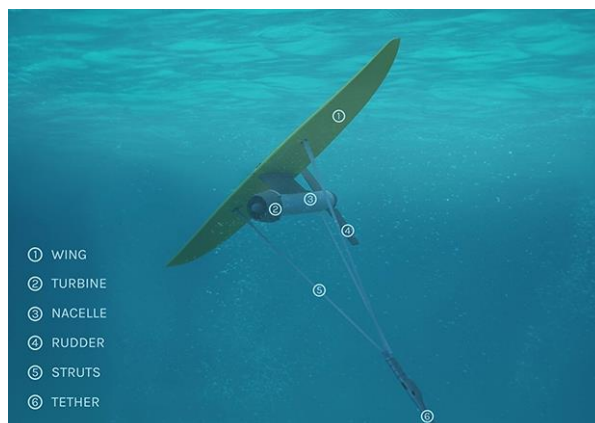


Figura 2-9 Diseño de cometa submarina [26]

La cometa está diseñada para generar una fuerza de elevación al ser golpeada por la corriente. El ala requiere una estructura ligera, a la vez que determinadas propiedades mecánicas que permitan su correcto uso durante los 20 años que se le estiman de vida útil [26].

Otro país interesado en las corrientes marinas como medio de obtención de energía es Japón. Las empresas encargadas de desarrollar el proyecto son IHI Corp. Y Toshiba Corp. La localización específica para instalar el sistema aún está por determinar, aunque sí se tiene una idea estimada de cómo será el sistema empleado. El sistema incluye un tándem compuesto por dos turbinas contrarrotatorias que estarán ancladas al fondo y flotarán como una cometa gracias a la fuerza de la corriente. Se espera que el proyecto demuestre la viabilidad de este tipo de energía y asegure la obtención de energía de un país tan industrialmente avanzado como lo es Japón [27].

2.1.3 Energía de las olas

Las olas se definen como la oscilación periódica de la superficie del agua, de mares y océanos, por causa de distintos agentes como el viento, las fuerzas de atracción gravitacional de la Luna y el Sol, maremotos, tormentas, etc.

El viento es el agente que genera las olas más comunes y de mayor intensidad energética, por lo que el aprovechamiento de la energía de las olas se basa en aprovechar la energía de las olas por el viento. El viento es un fenómeno que se puede definir como el movimiento horizontal de la masa de aire, que se genera por los cambios de presión atmosférica, producidos a raíz de las variaciones térmicas por causa de la radiación solar. Así pues, se puede afirmar que las olas son un efecto terciario de la energía solar. El tamaño de las depende de tres factores básicos:

- La intensidad, o velocidad de acción del viento en contacto con el agua
- La duración del tiempo de contacto
- El alcance o *fetch*, distancia sobre la cual el viento actúa sobre el agua

Las zonas oceánicas en las que se transmite mayor cantidad de energía son las expuestas a los vientos regulares, es decir, entre latitudes de 40° y 65° del océano Atlántico y Pacífico, mientras que, por el contrario, las zonas tropicales son aquellas en las que menor posibilidad de aprovechamiento undimotriz existe [28].

Estudios sostienen que el 15% de la demanda energética mundial podría extraerse de la energía undimotriz [29]. La también denominada energía olamotriz hasta el momento no ha sido apenas

aprovechada, pero se avecinan cambios que prometen ser importantes para el futuro energético. Europa es un continente pionero en este tipo de energías, situándose Reino Unido como el país dominante en este ámbito seguido por Portugal, España y Dinamarca [30] y [31].

Los convertidores consisten en dos componentes esenciales: el elemento interfaz que es accionado directamente por las olas y el sistema de transmisión de potencia. Varios proyectos han sido llevados a cabo en el marco de la energía undimotriz.

a) *Sistemas de rebosamiento (overtopping)*

Son aquellos dispositivos que capturan una cantidad de agua en el momento en que la ola los rebasa. El agua se devuelve al mar una vez que se hace pasar por una turbina que genera energía. Se puede decir, por lo tanto, que basan su principio de funcionamiento en la conversión de energía potencial en mecánica.

Wavedragon fue el primer sistema de rebosamiento instalado y capaz de funcionar en alta mar. El principio de funcionamiento del *Wavedragon* es francamente sencillo. La ola sube por una rampa orientada para tal fin, elevándose hasta un tanque por encima del nivel del mar donde el agua se hace pasar por un número de turbinas obteniéndose, así, energía mecánica. *Wavedragon* tiene cierta similitud con una presa, en la que el agua se almacena para más tarde convertir su energía potencial en energía mecánica. La principal ventaja del *Wavedragon* es su simpleza y robustez, pues tan sólo posee un elemento móvil: las turbinas. Una propiedad del *Wavedragon* que lo hace diferente a otras estaciones de captación de energía, es que se trata de un sistema flotante y estacionario. *Wavedragon* se fondea, como lo haría un barco o una boya, en aguas profundas (preferiblemente más de 40 metros, para aprovechar las olas oceánicas antes de que pierdan energía según se aproximan a costa) [32]. El primer prototipo de *Wavedragon* se instaló en 2003 en las costas danesas. Este prototipo batió el record mundial al ser capaz de abastecer de electricidad durante más de 20.000 horas.

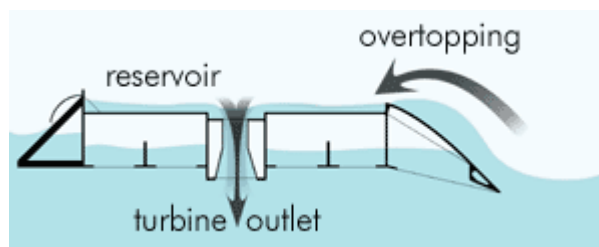


Figura 2-10 Esquema de funcionamiento del Wavedragon [33]

b) *Atenuador*

Consiste en un elemento flotante que opera en paralelo a la dirección de la ola. Este tipo de dispositivos basan su funcionamiento en el movimiento relativo de sus partes debido al movimiento oscilante de las olas. Al igual que el resto de elementos fuera de costa, hacen necesario el transporte de energía, lo que obliga al tendido de cables submarinos, su principal desventaja.

Un ejemplo de dispositivo capaz de extraer energía de las olas es *Pelamis*. Se trata de una estructura articulada, semirrígida, compuesta de secciones cilíndricas unidas por juntas con bisagras. La articulación de los cilindros permite la flexión en dos direcciones: vertical y horizontal. El movimiento de las olas acciona cilindros hidráulicos, que bombean aceite a alta presión hacia un sistema de motores hidráulicos a través de acumuladores hidráulicos regulables. Los motores hidráulicos accionan generadores eléctricos para obtener electricidad. Al igual que en el caso de *Wavedragon*, *Pelamis* se encuentra fondeado. El sistema está diseñado para producir energía incluso con la mar en estado de

calma. Además, *Pelamis* se puede configurar para aprovecharse del fenómeno de la resonancia, permitiendo maximizar la generación, tanto en caso de mar en calma, como en caso de tormenta. La estructura tiene 180 metros de longitud y unos 4 metros de diámetro [34]. *Pelamis* es un proyecto desarrollado por la empresa escocesa Ocean Power Delivery. Fue en Portugal donde se inauguró la primera granja o parque de olas, naciendo *Okeanós*, en la costa de Aguçadoura. Cada parque es capaz de producir aproximadamente 2,25 MW.



Figura 2-11 Pelamis [24]

No obstante, la arriesgada apuesta que la población portuguesa de Aguçadoura llevó a cabo en 2009 resultó salir cara, pues seis meses después de su instalación, hubo que desconectar la plataforma *Pelamis* por excesivos desgastes y por los costes financieros (más elevados de lo que se esperaba) que los mismos acarreaban [35].

c) *Convertidor de movimiento oscilante*

Se denominan así todos aquellos sistemas que convierten la energía de la oscilación provocada por las olas. El brazo oscila como un péndulo en respuesta al movimiento del agua. Hacen necesario el transporte de electricidad o de fluidos mediante el tendido de cables o tuberías submarinas.



Figura 2-12 Esquema de funcionamiento de un convertidor de movimiento oscilante [36]

En este ámbito, un proyecto, de elaboración escocesa, es el *Oyster*, un sistema que capta energía undimotriz desde el año 2009 en las costas de Orcadas (Orkney), un archipiélago ubicado al norte de Escocia. Este artefacto está compuesto por una plancha de 26 metros, parcialmente sumergida y fijada

al fondo por medio de dos cilindros hidráulicos. El principio de funcionamiento del *Oyster* es el siguiente: las olas, al chocar con la plancha (que, generalmente, se encuentra en posición perpendicular respecto del sentido de las olas) transmiten su cantidad de movimiento, haciendo pivotar la plancha. Esta, estando fijada a los cilindros, los acciona. Son estos cilindros los que impulsarán agua a presión hasta una estación (por medio de tuberías submarinas) en la que se encuentra instalada una turbina. Esta, accionada por el agua a presión convierte la energía cinética del agua en energía mecánica, que será convertida en eléctrica. Este tipo de instalación suele establecerse a unos 500 metros de costa y a profundidades de entre 10 y 15 metros. Cada sistema es capaz de producir hasta 800 kW. Desde el año 2014, Aquamarine Power está llevando a cabo el proyecto de instalar este tipo de artefacto en la costa de Lewis, al este de Escocia.



Figura 2-13 Oyster 800 [20]

d) Columna de agua oscilante

Una columna de agua oscilante (CAO) consiste en un sistema que se encuentra parcialmente sumergido, dentro de una estructura hueca. Está abierta al mar por debajo del nivel del mar, encerrando una columna de aire en la parte superior de la columna de agua. Las olas provocan que la columna de agua suba, comprimiendo el aire de la parte hueca. Si este aire comprimido se hace pasar por una turbina, se obtendrá energía mecánica. Este sistema de captación, instalado en costa, se basa, por lo tanto, en la conversión del movimiento de la ola en energía mecánica. La principal ventaja de este tipo de sistemas de aprovechamiento de energía undimotriz es que no es necesario establecer ningún tipo de cableado submarino, por estar instalado en la misma costa. No obstante, presenta una clara desventaja respecto a otros sistemas, y es que para su construcción es necesario modificar la costa.

En el ámbito de la energía undimotriz, y más concreto en el del CAO, España no se queda al margen. En julio del 2007, se inauguraba en Mutriku, Guipúzcoa, la primera central de energía de las olas conectada a la red en Europa (continental). Promovida por el Ente Vasco de la Energía (EVE), produce anualmente 450 MWh y supuso una inversión de 2,3 millones de euros [37]. La planta energética de Mutriku cuenta con 16 turbinas, con una potencia instalada total de 296 kW. La tecnología de la que hace uso esta planta es la denominada Columna de Agua Oscilante, ingenziata por la compañía escocesa Wavegen, perteneciente al grupo Voith Hydro.

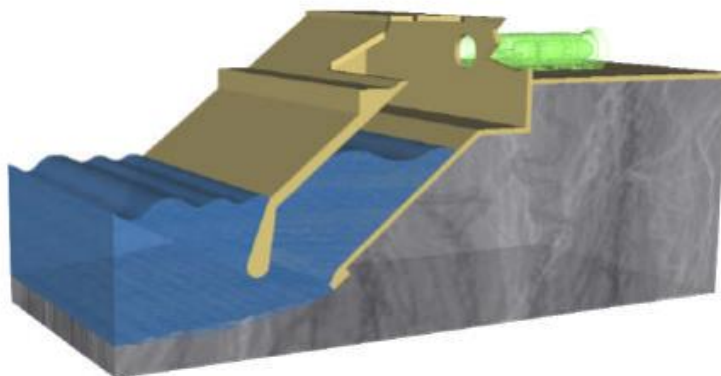


Figura 2-14 Diseño de tecnología CAO. Fuente: Wave Power in Europe [38]

La planta cuenta con 16 cámaras de aire dentro del dique, por lo que, al atacar la ola, el agua hace aumentar la presión del aire de las cámaras, subiendo éste y pasando por las turbinas haciéndolas girar. Lo mismo ocurre, pero en sentido contrario, cuando la ola se retira. En este momento, el agua retirada crea una presión negativa, atrayendo hacia sí el aire y haciendo girar la turbina. La principal ventaja de este tipo de tecnología es que el agua de mar nunca está en contacto con los mecanismos de la turbina, impidiendo, entre otros, la corrosión y facilitando el mantenimiento de los elementos que los componen.



Figura 2-15 Planta de captación de energía undimotriz en Mutriku [39]

Además, las turbinas empleadas para aprovechar la energía almacenada en las olas son de tipo *Wells*. Estas turbinas son de baja presión y rotan constantemente en una sola dirección, independientemente del sentido del flujo de aire que la atraviesa. Es esta tecnología la que permite que las turbinas aprovechen tanto el flujo creado por la presión de la ola que ataca, como el vacío generado por la ola retirándose, debido al diseño especial de sus álabes.



Figura 2-16 Turbina Wells [40]

e) Oscilantes verticales

Son absorbedores de punto aquellas estructuras que absorben energía de todas las direcciones a través de sus movimientos en la superficie o cerca de ella. Convierten, pues, el movimiento de la boya en energía mecánica. Estos sistemas, una vez captada la energía, hacen necesario el transporte de la misma a costa, lo que implica la instalación de cables eléctricos en el fondo marino.

Un proyecto de este tipo llevado a cabo en España, pero en este caso, en la costa cantábrica es el *PowerBuoy*. Se trata de una planta de energía de las olas con tecnología OPT (Ocean Power Technologies). Situada en Santoña, esta zona tiene un oleaje cuya amplitud oscila entre 1 metro y 5 metros. La idea es que la planta se conforme por 10 boyas (una de hasta 40 kW y 9 de 150 kW) que generarían, en conjunto, entre 1,25 y 2 MW de potencia. Cada boya tiene 6 metros de diámetro y se encuentra introducida en un compartimento cilíndrico estanco de unos 20 metros de longitud [30]. El principio de funcionamiento de este tipo de tecnología es la obtención de energía a partir del movimiento relativo entre el flotador y el mástil: el movimiento ascendente y descendente de la boya es transmitido a un pistón al que se unen dos mangueras flexibles que funcionan como bombas de agua. Las mangueras impulsan el agua a presión por un tubo hacia un acumulador situado en la parte superior del sistema. En el interior de la boya se aloja una turbina *Pelton* que acciona un generador y produce electricidad. Las boyas se situarían a una distancia de costa de unos 3 o 4 km.

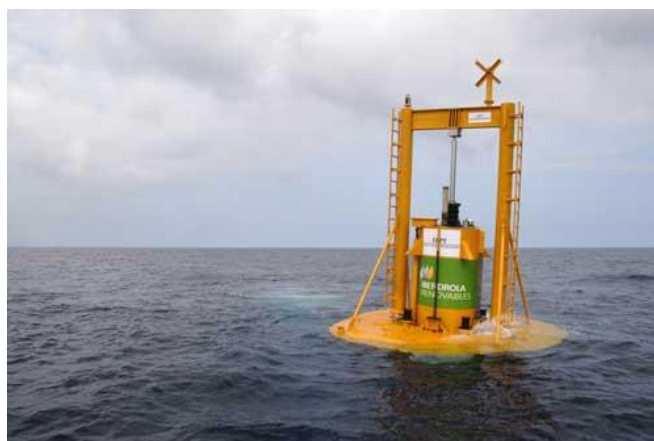


Figura 2-17 PowerBuoy instalada en Santoña [41]

f) *Diferencial de presión sumergido*

Se trata de dispositivos típicamente localizados cerca de costa y, de alguna forma, fijos al fondo marino. El movimiento de las olas provoca que el nivel del mar fluctúe sobre el aparato, induciendo diferencia de presión en el mismo. Un alternador de presión bombea fluido a través del sistema para generar electricidad.

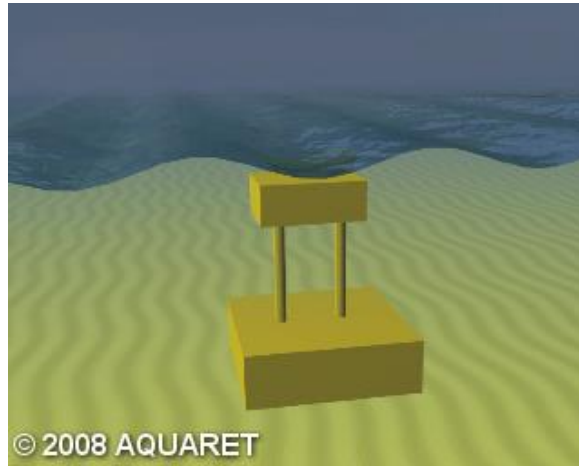


Figura 2-18 Simulación de un diferencial de presión [24]

Un ejemplo de este tipo de sistemas es el proyecto diseñado por PIPO Systems (Figura 2-19). Este sistema *APC-PISYS* (Absorbedor Puntual Complementado de PIPO Systems) contempla los sistemas en que boyas sumergidas de volumen variable trabajan simultáneamente con otras en superficie. La idea de este tipo de dispositivos es el hecho de que la ola, al pasar sobre la boya sumergida, crea en esta una diferencia de presión, ganando o perdiendo altura según la columna de agua sobre ella es mayor o menor [42].

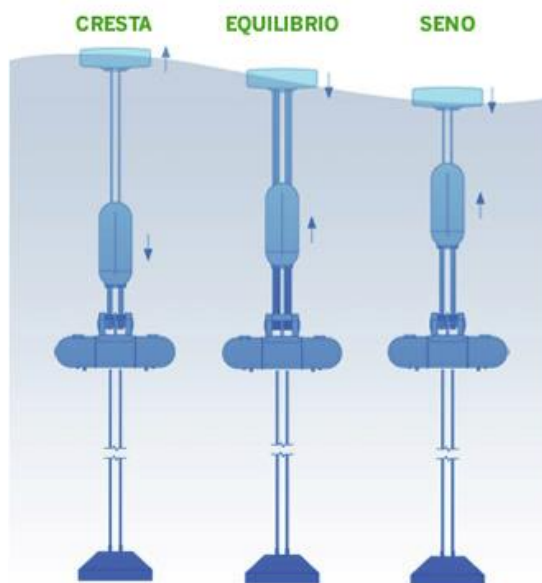


Figura 2-19 Esquema de funcionamiento del APC-PISYS [42]

g) Comba de oleaje

La tecnología de este tipo de aparato consiste en un tubo de goma lleno de agua, fondeado al fondo marino e instalado en la dirección de la ola. El agua entra por la parte trasera y la ola crea variaciones de presión a lo largo del tubo, dando lugar al movimiento de ‘comba’. Según el agua atraviesa el tubo, se transmite hasta la parte delantera, donde una turbina transforma la energía y, finalmente, regresa al mar. Se trata de un tipo de dispositivos que se encuentran en fase experimental.

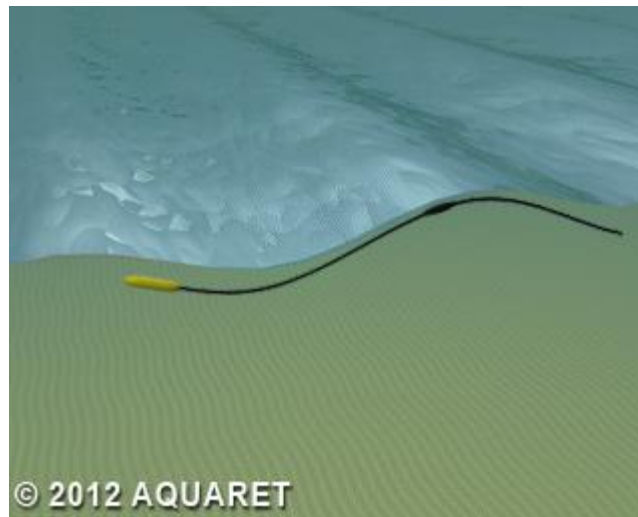


Figura 2-20 Simulación de una comba de oleaje [24]

h) Masa rotatoria

Este tipo de dispositivo se usa para captar energía de la ola de por el movimiento de cabezada y balanceo que la ola provoca en él [24].

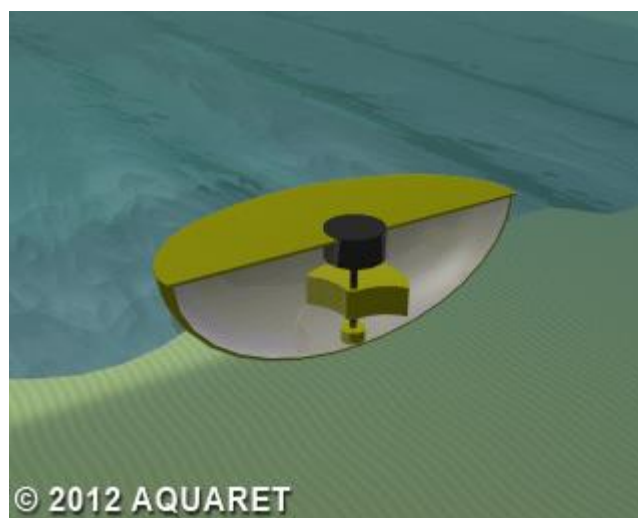


Figura 2-21 Simulación de una masa rotatoria [24]

Actualmente se ha producido un aumento de la conciencia pública sobre las cuestiones ambientales y de energía, lo que ha estimulado un aumento en todo lo referente al desarrollo de tecnologías renovables. Según un reciente estudio realizado por los consultores Fros & Sullivan, el recurso global de la energía de las olas puede valorarse en 6.000 TWh/año, el doble de la producción actual de las centrales nucleares, lo que supone un potencial de mercado mundial cuantificable de 1 billón de dólares. Como resultado, han proliferado dispositivos de energía undimotriz nivel mundial. No obstante, la aceptación pública del uso de la ola como método de captar energía aún no ha tenido lugar, pues la energía undimotriz se encuentra en estado inmaduro en comparación como otras energías como la eólica.

2.1.4 Energía osmótica

La energía osmótica, también denominada de gradiente salino, o simplemente energía azul, es aquella que hace uso de la diferencia de densidades entre fluidos, o lo que es lo mismo, la diferencia de concentración salina. La energía azul se suele encontrar allá donde existe gran diferencia de densidad entre fluidos. Por ello, las desembocaduras de los ríos son lugares propicios para tal efecto. La ósmosis, un fenómeno físico-químico que se produce en las células de los seres vivos, en la que una membrana semipermeable permite pasar sólo determinadas sustancias, se imita en una planta de energía osmótica. Así pues, con la ayuda de una membrana artificial que separe dos cámaras, una con agua dulce y otra con agua salada, la primera es capaz de atravesar la membrana incrementando el volumen en el depósito de agua salada. Este hecho produce un importante aumento de presión equivalente a un salto de agua de unos 120 metros de altura. Con esta potencia es posible mover una turbina y generar electricidad. La energía azul presenta un gran potencial, principalmente en desembocaduras de ríos caudalosos.

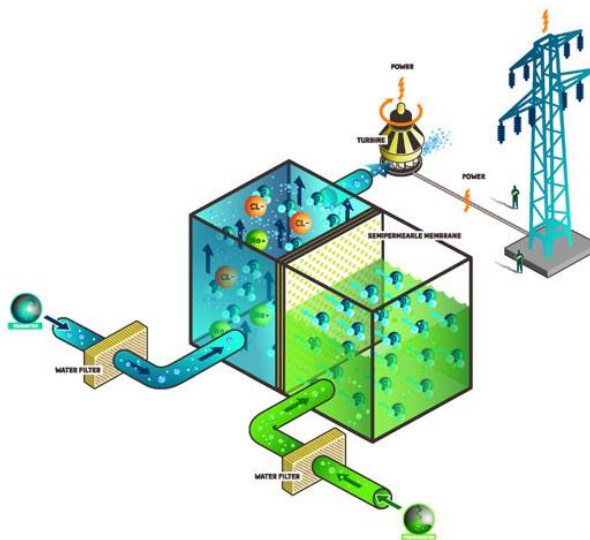


Figura 2-22 Principio de funcionamiento de la energía osmótica [43]

Noruega es consciente del potencial que este tipo de energía puede desarrollar, quizá por esta razón, fue el primer país del mundo en adoptar este tipo de sistema de captación de energía renovable. La empresa encargada del proyecto fue *Statkraft*. El prototipo comenzó a producir electricidad el 24 de noviembre del 2009, un año después del inicio de su construcción. Por la planta circulan 10 litros de agua dulce y 20 litros de agua salada por segundo y esta produce entre 2 y 4 kW. Sin embargo, se estima que con mejores membranas se pueda llegar a producir hasta 10 kW.

2.1.5 Energía maremotérmica

La energía maremotérmica basa su funcionamiento en la diferencia de temperaturas existente en el océano. Esta diferencia de temperaturas viene determinada por la profundidad, pues a más profundidad, menos intensidad de radiación solar. La distribución vertical de temperaturas en el océano abierto consiste en dos capas separadas por una interfaz: una capa superior de agua relativamente caliente, con una temperatura uniforme (20-200 m) y, por debajo, una zona limítrofe, denominada termoclina, caracterizada por un descenso de la temperatura (200-400 m). Este gradiente térmico oceánico supone una importante fuente de energía, denominada energía maremotérmica, la cual puede ser extraída para producir electricidad mediante la utilización de una máquina térmica, que teóricamente, operaría de la misma manera que una central térmica convencional, con la salvedad del uso de recursos limpios. Así, el agua caliente de la capa superior oceánica actúa como fuente de calor, mientras que el agua extraída de las profundidades actúa como refrigerante. La diferencia entre las dos masas de agua determinará el rendimiento de la máquina, hasta el punto de que no es rentable usar este tipo de energía en ciertas zonas del océano.

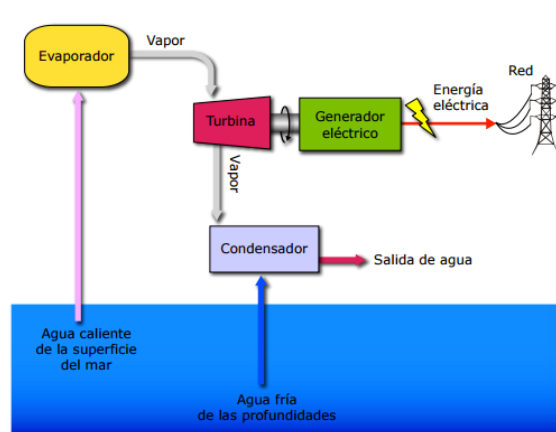


Figura 2-23 Esquema de funcionamiento de una planta de energía maremotérmica [44]

La radiación solar produce un gran calentamiento de las superficies marinas ecuatoriales, llegando a alcanzar temperaturas de 28°C. Esto produce que el agua almacene una importante cantidad de energía calorífica, ya que, aunque es relativamente baja, las cantidades de agua involucradas son enormes. Para el uso de este tipo de energía, es requisito necesario que la diferencia de temperaturas sea de, al menos, 20°C. De esta forma, las zonas más favorecidas serían las de las zonas ecuatoriales y subtropicales.

El aprovechamiento de los gradientes térmicos se lleva a cabo en las denominadas plantas maremotérmicas. En estas plantas se transforma la energía térmica en eléctrica utilizando un ciclo termodinámico denominado ciclo de Rankine, en el que se emplea calor para evaporar un líquido, cuyo vapor se utiliza en el accionamiento de una turbina, que, acoplada a un generador eléctrico, produce energía eléctrica [44].

Un ejemplo de este tipo de plantas energéticas se encuentra en Hawaii, donde en 2015 se inauguró una planta de energía maremotérmica generadora de 100kW de potencia, capaz de suministrar energía a 120 hogares de la isla durante las 24 horas del día.

Sistema	Energía captada (TWh/año)
Mareomotriz	300
Corrientes	800
Undimotriz	8.000-80.000
Gradiente térmico	10.000
Gradiente salino	2.000

Tabla 2-1 Comparación de sistemas de energía marina [36]

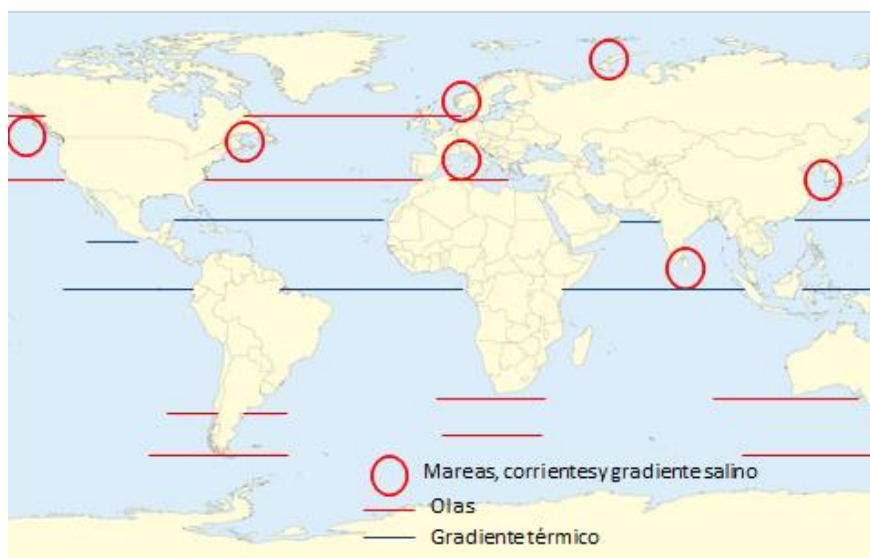


Figura 2-24 Recurso energético mundial de las diversas formas de energía del mar

2.2 Zonas de experimentación en mar abierto

Con la finalidad de probar la funcionalidad y eficiencia de los distintos tipos de sistemas de captación de energía marina, se han desarrollado (especialmente en Europa) una serie de áreas para tal efecto.

2.2.1 BIMEP

Un ejemplo de este tipo de zona es la Plataforma BIMEP. Esta plataforma se encuentra situada en la costa de Vizcaya, en la localidad de Armintza-Lemoiz, en una de las zonas de mayor potencial energético de la costa vasca, y por ende, de la geografía española tal y como se verá más adelante en este TFG. Además, las características del mar Cantábrico crean unas condiciones excepcionales para probar la eficacia de nuevos mecanismos y tecnologías para el aprovechamiento energético de las olas.

La zona del mar ocupa una superficie total de 5,3 km², situándose el punto más cercano a la costa a una distancia de 1.700 m (Figura 2-25).

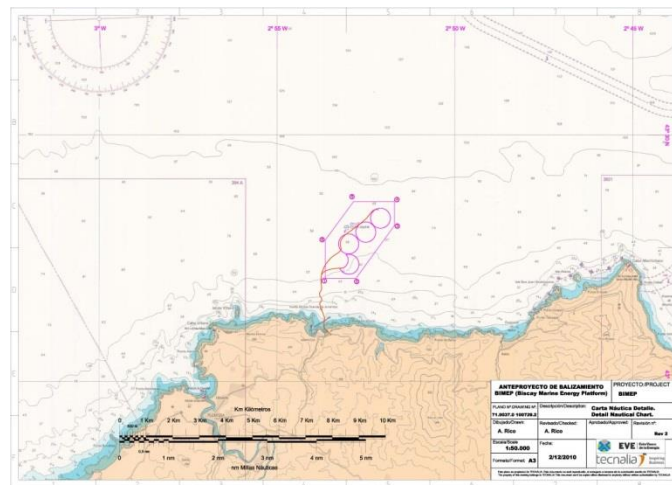


Figura 2-25 Localización de la infraestructura BIMEP [45]

BIMEP cuenta con instalaciones abiertas que permiten que los fabricantes de sistemas de generación renovable marina instalen sus equipos en ella, bien para explotación-demostración o bien para pruebas.

Por otro lado, dispone de todos los permisos necesarios para que un usuario pueda instalar su dispositivo sin tener que pasar un largo proceso administrativo. No obstante, el usuario debe satisfacer una serie de requisitos mínimos para contar con los servicios de BIMEP, tales como requisitos generales de diseño, de estructura, del sistema de fondeo, eléctricos, relativos a la transmisión de datos y medioambientales.

BIMEP aporta una serie de servicios para el desarrollo e investigación de los sistemas de captación de energía undimotriz:

- Servicio de ocupación, que incluye alquiler en la parcela de pruebas para los captadores.
- Servicios de información.
- Servicios de seguridad.
- Servicios de generación de energía con conexión a la red eléctrica y gestión de la venta de energía, así como análisis de la calidad de energía generada.
- Servicios de verificación, con evaluación del rendimiento energético del dispositivo.
- Subcontratación de trabajos en mar, que incluye remolque de dispositivos y apoyo en tareas de mantenimiento.
- Servicios tecnológicos con análisis de datos y verificación de aspectos mecánicos, eléctricos, oceanográficos y medioambientales.
- Servicios de I+D+i.

BIMEP cuenta con unas modernas infraestructuras submarinas de conexión a la red eléctrica en tierra y de un sistema de telecomunicaciones para recoger y analizar sistemáticamente los datos de los sistemas que se ensayan en mar:

- Boyas de balizamiento que delimitan el área de mar reservada para la infraestructura

- Boya oceanográfica, equipada con diferentes tipos de sensores para monitorizar las condiciones atmosféricas y de olaje de la zona.
- Cables submarinos de potencia y control (4 cables de 5MW cada uno).
- Cuatro áreas de fondeo con sistemas de conexión eléctrica. En cada área pueden conectarse varios captadores.
- Conectores eléctricos submarinos. [45]

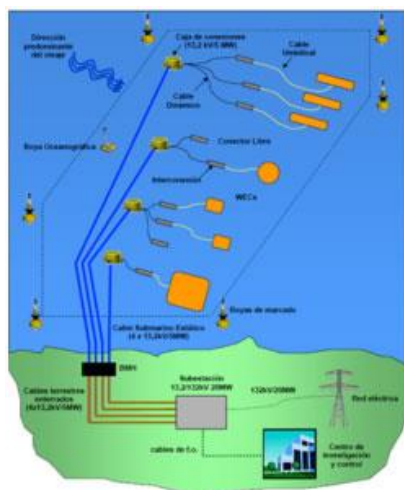


Figura 2-26 Diagrama de la infraestructura BIMEP. [45]

2.2.2 WaveHub

Otro ejemplo ilustrativo de este tipo de áreas es WaveHub. Tiene zonas de pruebas de energía undimotriz en Cornualles (sur de Inglaterra) y en Pembrokeshire (suroeste del Reino Unido) y una zona de pruebas de energía mareomotriz en el norte de Devon (sur de Inglaterra). Los objetivos del sistema de pruebas WaveHub son:

- Acelerar y promover el desarrollo de energía renovable *off-shore*
- Llevar a cabo búsqueda e innovación en el ámbito de la energía renovable.
- Constituir el último paso hasta la comercialización de los prototipos.
- Fomentar una industria creciente en el entorno de las energías renovables del Reino Unido.
- Asegurar que el Reino Unido se mantenga a la vanguardia de las energías renovables marinas.

Además, WaveHub ofrece una serie de ventajas a sus clientes:

- Cuatro zonas de amarre para la prueba de prototipos de captación de energía marina.
- Sistema eléctrico conectado a la infraestructura terrena, con capacidad de exportar 30 MW y ampliables hasta 48MW.
- Posibilidad de alquilar el amarre durante 25 años.
- Profundidades variables entre 48 y 58 m.
- Monitorización remota por medio de fibra óptica.
- Acceso a apoyo financiero [46]

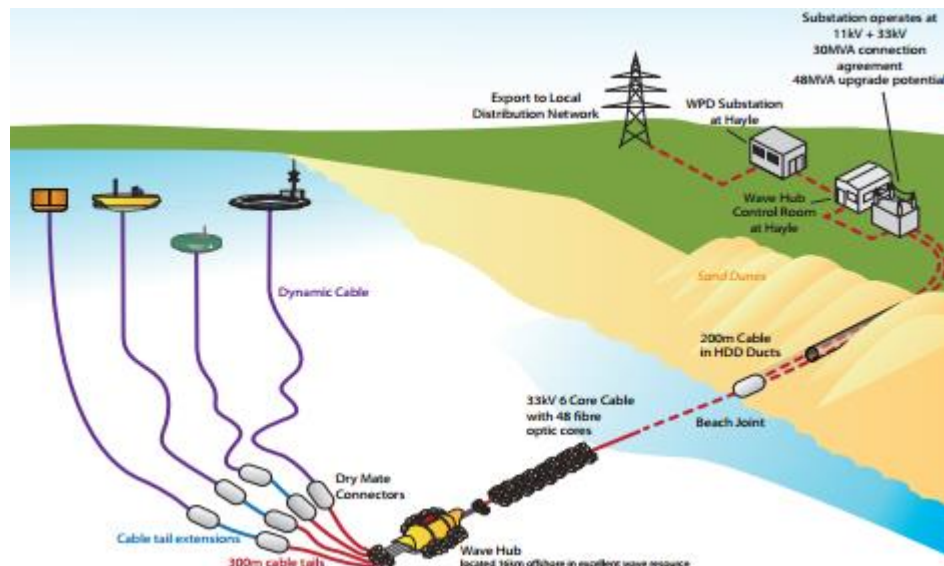


Figura 2-27 Esquema del área WaveHub [46]

2.2.3 EMEC

Otro lugar en el que se puede probar los prototipos de obtención de energía marina, tanto de las olas, como de las mareas, es EMEC. Situado en Orkney, al norte de Escocia, esta zona de prueba proporciona múltiples puntos de amarre para tal fin. Al igual que sus competidores, EMEC está conectado a la red eléctrica terrenal.

Tiene dos zonas principales: la zona de energía mareomotriz y la zona de energía undimotriz. Ambas zonas son idóneas en su ámbito. El área para obtención de energía undimotriz fue construida en 2003 y se encuentra situado al oeste de la isla de Orkney. Las olas de la zona tienen una altura media de entre 2 y 3 metros, pero se han llegado a alcanzar alturas que rondan los 17 metros. Esta área cuenta con 5 cables de amarre de hasta 70 metros de profundidad, localizados a unos 2 kilómetros de la costa. Cada cable submarino soporta hasta 11 kV y transporta la electricidad a la costa.

En cuanto a la zona de obtención de energía mareomotriz, se encuentra situada al oeste de la isla de Eday. Así como es idónea la zona de energía undimotriz debido a la altura media de la ola, la mareomotriz también. Y es que las corrientes de mareas pueden llegar a alcanzar los 8 nudos de intensidad. EMEC ofrece ocho cables de amarre en sondas de entre 12 y 50 metros en un área de 2x4 kilómetros.

2.2.4 PLOCAN

PLOCAN es un centro competente en el sector marino-marítimo que proporciona una infraestructura para el desarrollo de investigación científica y tecnológica oceánica de vanguardia. La instalación cuenta con un banco de pruebas científico y uno industrial. El banco de pruebas se compone de un área marina con conexión eléctrica y de datos para probar tecnología oceánica de vanguardia. PLOCAN, situado en las Islas Canarias, ofrece a sus usuarios datos y conocimiento de los parámetros oceánicos, tales como las corrientes, polvo en suspensión estacional, morfología, temperatura, etc.

3 DESARROLLO

3.1 Origen de la energía undimotriz

Las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar: el calentamiento de la superficie terrestre produce viento y este a su vez genera oleaje. Es así como el 0,3% de la energía del Sol que llega a la superficie terrestre se transforma en energía undimotriz. El viento se origina como consecuencia del desigual calentamiento que el Sol produce en la superficie terrestre y, al actuar sobre el agua del mar le transmite energía y la pone en movimiento, produciendo ondulaciones en las capas superficiales que constituyen el oleaje que se observa en todas las aguas de los océanos y que golpean las costas de los continentes. En ese sentido, se podría afirmar que la energía de las olas oceánicas constituye una forma de almacenar en la superficie de los océanos, con una densidad relativamente alta, la energía solar, ya que es capaz de recibir energía, transportarla de un lugar a otro y almacenarla. Como la densidad del aire es mucho menor que la del agua, en la superficie libre, las partículas tienen más libertad para la traslación, por lo que las olas se desplazarán en la superficie del mar pero no hacia el fondo marino. Por otro lado, las olas se desplazan durante grandes distancias con pérdidas mínimas, por lo que la energía generada en cualquier parte del océano se concentra en las costas, lo que permite que se pueda extraer energía de ella sin necesidad de instalar sistemas de captación demasiado lejos de costa [30].

Los mecanismos que intervienen en la interacción entre el viento y la superficie del mar son complejos, pero se pueden resumir de la siguiente manera: cuando el viento sopla a través de la superficie del mar, las moléculas de aire interactúan con las moléculas de agua que están en contacto. La fuerza que se genera entre el aire y el agua modifica la superficie del océano, dando lugar a pequeños rizos, conocidos como olas de capilaridad. Las olas de capilaridad provocan que exista mayor superficie de contacto entre aire y agua, incrementándose así la fricción entre el agua y el viento. Ello da lugar a una mayor superficie de contacto, lo cual origina el crecimiento de la ola que, cuando ha alcanzado un cierto tamaño, facilita que el viento pueda ejercer una mayor presión sobre ella con el consiguiente incremento de la altura de la misma.

3.1.1 Parámetros de la ola

Las olas se caracterizan por su longitud de onda L , altura de onda H y el período T .

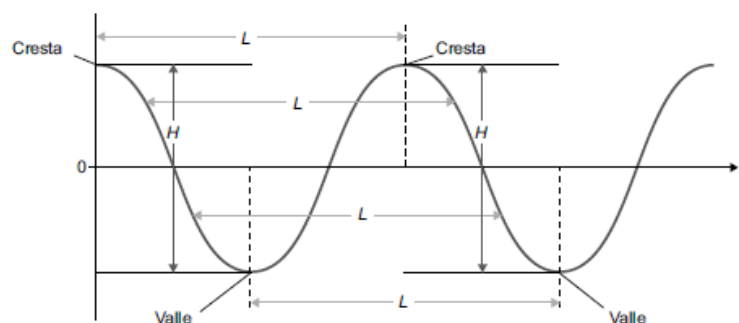


Figura 3-1 Características de una onda sinusoidal pura [17].

La longitud de onda es la distancia entre dos picos consecutivos. La altura de onda es la diferencia en altura entre un pico y un valle. El período es el tiempo en segundos que tarda un valle o un pico en recorrer su longitud de onda. La frecuencia f de la ola se define como el número de oscilaciones pico a pico de la superficie de la ola por segundo, visto por un observador fijo.

En realidad, el océano no se compone de ondas sinusoidales puras como la representada en la Figura 3-1 Características de una onda sinusoidal pura., sino que más bien son una superposición de muchas de ellas, cuya superficie puede ser reconstruida como suma de ondas de amplitud variable (Figura 0-1 Superposición de oleaje oceánico.).

A la zona donde se crean las olas se le denomina área de generación. Una vez las olas abandonan esta área de generación, impulsadas por el viento que las creó, sus crestas se hacen más lisas y menos caóticas. A este oleaje se le denomina marejada de fondo o mar desarrollado.

La altura de las olas determina el estado de la mar quedando plasmado en la siguiente clasificación:

Mar número	Denominación del mar	Altura de las olas (m)
0	Calma	0
1	Rizada	0-0.1
2	Marejadilla	0.1-0.5
3	Marejada	0.5-1.25
4	Fuerte marejada	1.25-2.5
5	Mar gruesa	2.5-4
6	Muy gruesa	4-6
7	Arbolada	6-9
8	Montañosa	9-14
9	Enorme	>14

Tabla 3-1 Clasificación del mar en función de la altura de las olas [17].

3.1.2 Potencial energético de la energía undimotriz

La energía de los océanos es enorme. Incluso la fracción de la energía que es potencialmente explotable es muy grande comparada con el consumo actual de electricidad en el mundo.

La energía solar que llega a la superficie terrestre se puede calcular utilizando la llamada ‘constante solar’, que representa la cantidad total de energía por segundo que se recibe en el borde exterior de la atmósfera, considerando una distancia promedio entre la Tierra y el Sol. Si se asume un valor de 1353 W/m^2 de energía total del espectro solar se obtiene que la potencia solar absorbida por la Tierra es 375 W/m^2 .

El 0,75% de la irradiación solar que llega a la superficie terrestre genera las corrientes atmosféricas, los vientos, que transfieren el 40% de su energía a la superficie del mar. Por lo tanto, la energía solar transmitida al oleaje es [30]:

$$0,75\% \cdot 40\% \cdot 375 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ W/m}^2$$

Para una velocidad dada del viento, la energía de la ola puede estar limitada por el alcance o por la duración del mismo. Nace así un concepto denominado *océano en completo desarrollo*, que representa el momento en el que la energía del océano se equilibra con la energía que se pierde (por rompimiento de la cresta de la ola). Las olas, pues, no crecen indefinidamente aunque aumente el alcance o tiempo de duración del viento y *fetch* (distancia de aplicación del viento), sino que se alcanza un punto de equilibrio. El conocimiento del espectro energético de las olas es esencial en el diseño de sistemas de captación de energía undimotriz.

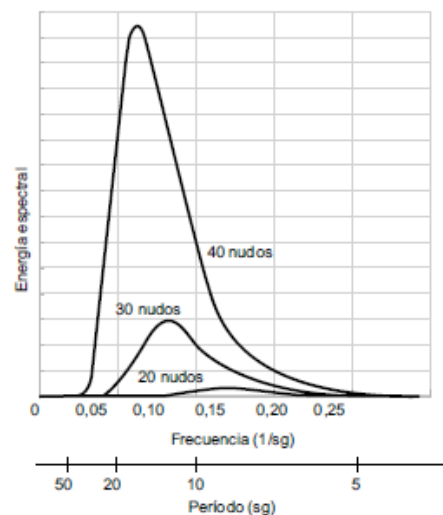


Figura 3-2 Espectro energético para un océano en completo desarrollo [17]

En el océano, es importante darse cuenta de que las partículas de agua no se mueven hacia la costa, sino que lo hacen en un movimiento ascendente y descendente. El movimiento descrito por las olas es similar al que realizaría una soga tras una perturbación a lo largo de su longitud. Así pues, una ola no representa un flujo de agua sino más bien una masa energética desde su origen hasta su ruptura, la cual puede experimentarse tanto en costa como en medio del océano. El comportamiento de las olas depende en gran medida de la relación que existe entre el tamaño de las olas y la profundidad del agua donde ésta se mueve. El movimiento de las moléculas de agua cambia de forma circular a elipsoidal cuando una ola llega a la costa.

Según las olas se van aproximando a la costa, su velocidad de avance y longitud de onda disminuyen, y su altura aumenta hasta que la velocidad de las partículas de fluido excede la velocidad de avance de la ola, produciéndose la inestabilidad y, por consiguiente, su ruptura. Esta situación se produce cuando la relación entre la altura de onda y la profundidad del agua es aproximadamente igual a 0,78.

La energía de una ola depende de la intensidad del viento que sopla sobre la superficie del océano, del tiempo en que el viento está soplando y del alcance o superficie sobre la cual sopla el mismo. Las olas oceánicas son, esencialmente, movimientos de energía que se dividen en dos tipos:

1. Las moléculas individuales de agua se están moviendo constantemente en una forma circular, y esta energía (cinética) puede ser utilizada en diferentes clases de aparatos de conversión de energía del oleaje, bien directamente vía alguna clase de hélice o indirectamente mediante dispositivos compuestos por columnas oscilantes de agua.

2. En su movimiento circular, las moléculas individuales de agua son elevadas encima de la línea inmóvil de la superficie del agua y entonces representa una energía potencial.

La potencia P en kW por metro de ancho de ola, contenida en una ola oceánica idealizada puede expresarse según la siguiente expresión:

$$P = \frac{g^2 \rho H^2 T}{32\pi}$$

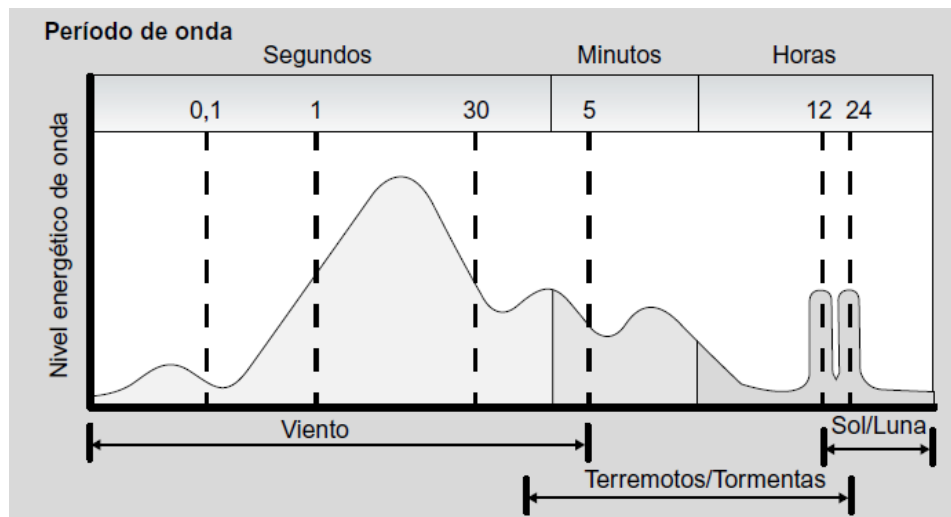


Figura 3-3 Energía de la ola en función de la fuente generadora [17]

Así pues, la potencia inherente a la ola es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud H y al período del movimiento T . Las olas con períodos largos (7-10 s) y grandes amplitudes (del orden de 2 m) tienen un flujo de energía que normalmente excede los 40-50 kW por metro de ancho de ola. Obsérvese en la Figura 3-3 que el pico de máxima energía corresponde a períodos entre los 4 y los 12 segundos, siendo las olas generadas por el viento las más aprovechables desde el punto de vista energético.

Con datos recopilados de los dispositivos de medición de parámetros de la ola es posible calcular la altura significativa de las olas H_s , lo cual se define como la altura promedio de la tercera parte de las olas más altas en un registro, y el período energético T_e , como el período que transcurre entre valores sucesivos del paso de una ola dos veces consecutivas por una línea imaginaria situada a mitad de distancia entre una cresta y un valle. Así pues, en un mar irregular típico, la potencia media total, en kW/m, será:

$$P_s = 0,49 H_s^2 T_s$$

Otras fuentes afirman que la potencia por metro de frente de la viene dada por la expresión –no teniendo en cuenta altura significativa ni período energético, sino altura y período de la ola- [30]:

$$P_s = 0,96H^2T$$

Quizá la primera expresión sea más acorde a la realidad por tratar con alturas de ola y períodos obtenidos por medios experimentales.

Para capturar la máxima energía de una ola, los aparatos deberían diseñarse para interceptar completamente los movimientos de las partículas de agua, es decir, deberían capturar la energía de todos los movimientos circulares de la ola. No obstante, al poseer las órbitas más profundas poco carácter energético, es más eficaz, desde el punto de vista tecnológico y económico, tratar de capturar sólo las más superficiales. De hecho, a la hora de diseñar un sistema de captación de energía undimotriz debe tenerse en cuenta que el 95% de la energía de una ola se encuentra entre la superficie y una profundidad de un cuarto de la longitud de ola L (Figura 3-4).

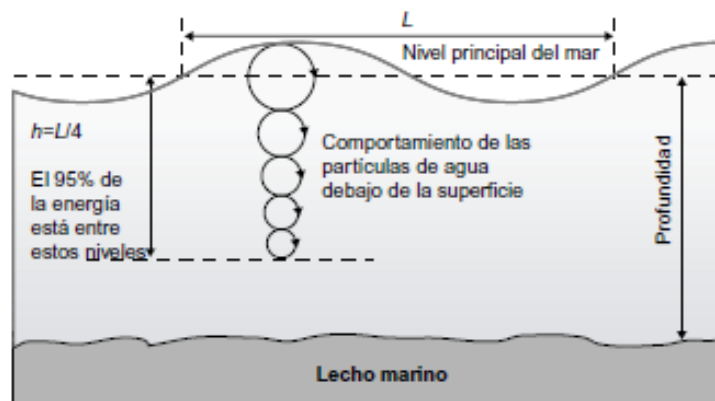


Figura 3-4 Comportamiento de las partículas de agua [17]

3.2 Recurso energético del oleaje en España

Para la elaboración del presente apartado, se ha hecho uso de la Evaluación del Potencial de la Energía de las Olas, redactado en el año 2011 y desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria y por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), en el que se trata, principalmente y en función de en qué parte de la costa peninsular, qué zonas del territorio Español son más propensas para la instalación de sistemas de captación de energía undimotriz.

3.2.1 Método de obtención de datos

En España existen importantes redes de observación de oleaje (Puertos del Estado, XIO, etc.) pero, a pesar de estar formada por un considerable número de boyas, esta red de observaciones está dispersa en el espacio, no cubriendo todas las áreas del litoral, por lo que para la realización de las gráficas, IDAE recurrió a modelos numéricos capaces de simular los procesos que dan lugar a la generación de oleaje a

partir de forzamientos atmosféricos, obteniendo un análisis homogéneo del recurso y una caracterización estadística más fiable en diferentes escalas temporales.

Las boyas son el instrumento de medida de oleaje *in situ* más extendido, pues proporcionan la información más completa y fiable del oleaje en una posición fija. Las boyas siguen el movimiento de la superficie del mar, determinando la evolución de la superficie libre en un punto gracias a un acelerómetro vertical situado en su interior. Además, algunas boyas llevan incorporados otros dispositivos, como inclinómetros o acelerómetros horizontales, y otros elementos para referenciar el norte magnético permitiendo estimar las aceleraciones horizontales o el ángulo y orientación de la inclinación de la boya obteniéndose, de esta forma, datos estadísticos del oleaje.

El Organismo Público Puertos del Estado (OPPE) dispone de redes fijas de medida en aguas profundas y costeras a lo largo del litoral español. Además, se dispone del conjunto de datos de la red XIOM (Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics), propiedad de la Generalitat de Catalunya, así como boyas del Gobierno Vasco gestionadas por AZTI. Por otro lado, se dispone de fuentes de información satelital, que es la única fuente de información instrumental que permite dar información global de oleaje, por medio de altímetros radar, que si bien permiten determinar variables oceanográficas de vital importancia como la marea meteorológica, la altura de ola o la velocidad del viento, presentan un gran inconveniente, y es que no proporcionan una gran resolución. Quizá por esta razón, su uso principal suele restringirse al complemento de datos medidos por boyas, visuales o de reanálisis.

Además, para determinar el nivel del mar, se dispone de la red de mareógrafos REDMAR del Organismo de Puertos del Estado, cuyo objetivo es la monitorización del nivel del mar en tiempo real y la generación de series históricas para su posterior explotación.

A los datos obtenidos con los instrumentos anteriormente mencionados, se añaden los modelos numéricos que ayudan a completar el análisis de los parámetros del oleaje en las costas españolas. Así pues, se obtienen resultados válidos.

Para la obtención de parámetros de potencia, se hace uso de MaxDiss, un algoritmo de máxima disimilitud que consiste en la selección de un subconjunto de datos representativos de la muestra. De esta manera, se dispondrá de datos de la distribución estadística del recurso.

3.2.2 Resultados

Los resultados obtenidos por los métodos enunciados en el punto 3.2.1: *Método de obtención de datos* se muestran en función de una serie de mallas de cálculo (Figura 3-5 y Figura 3-10).

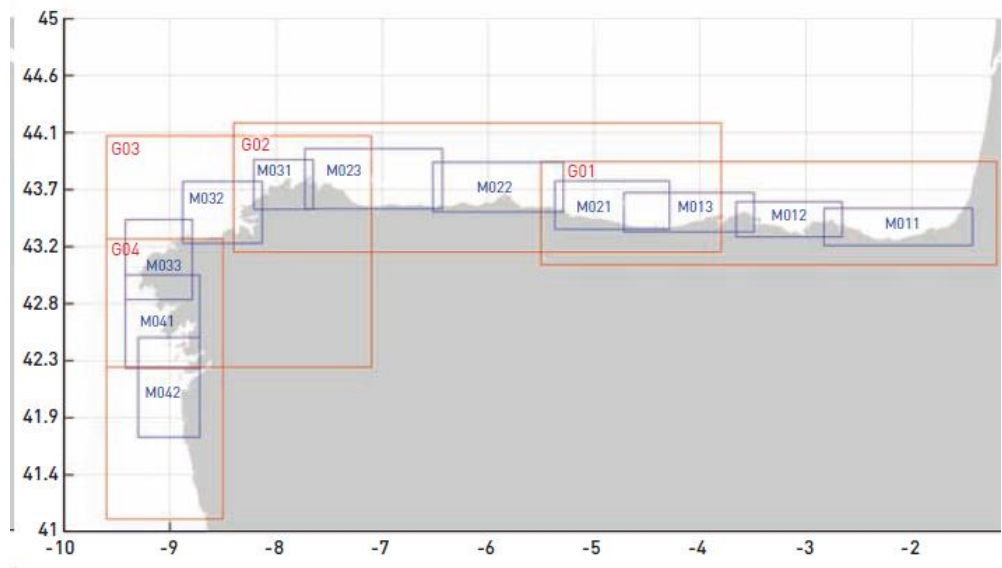


Figura 3-5 Malla de cálculo para el Cantábrico [47]

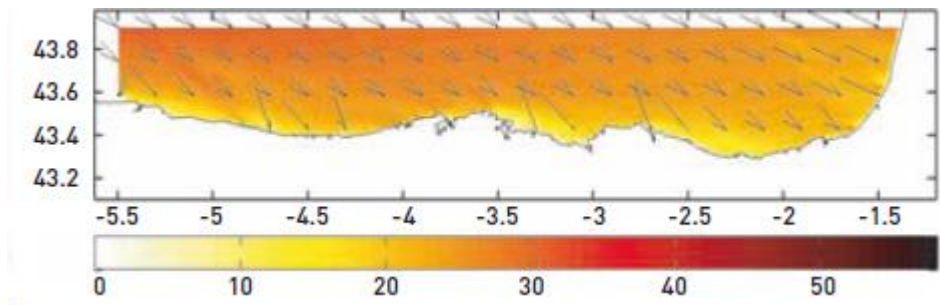


Figura 3-6 Potencia media en la malla de cálculo G01 (kW/m) [47]

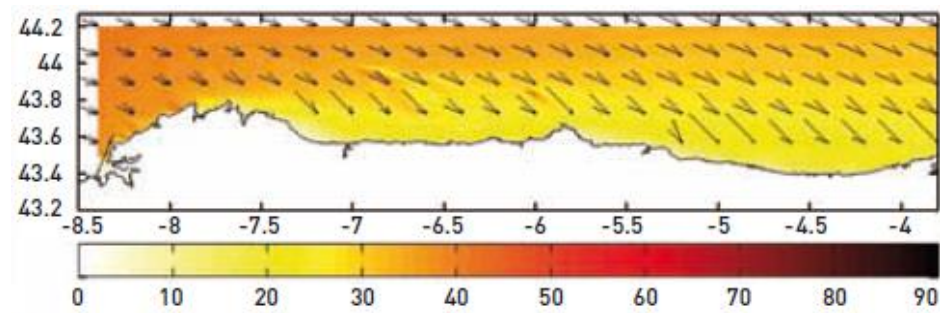


Figura 3-7 Potencia media en la malla de cálculo G02 (kW/m) [47]

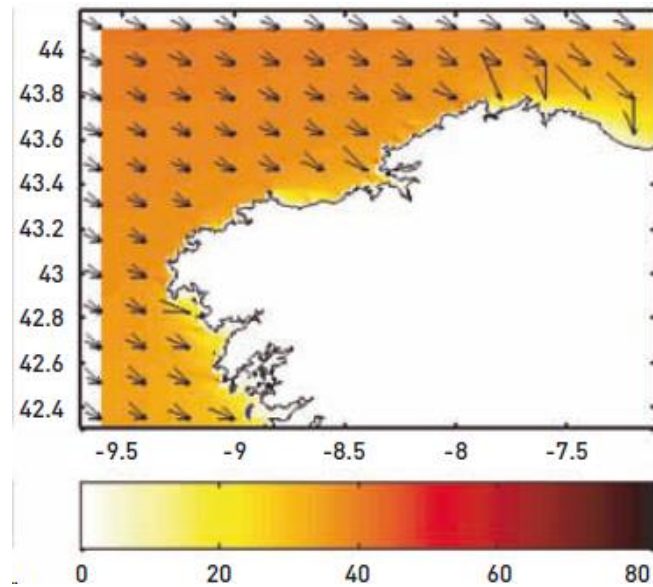


Figura 3-8 Potencia media en la malla de cálculo G03 (kW/m) [47]

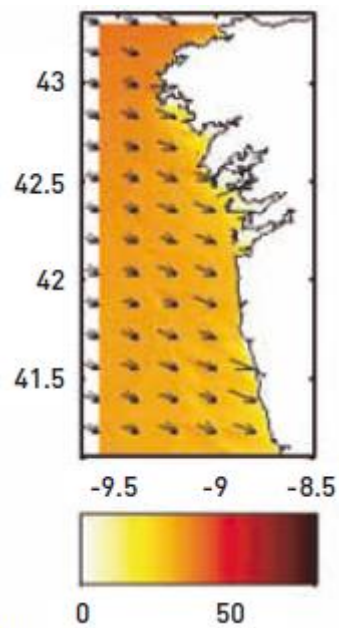


Figura 3-9 Potencia media en la malla de cálculo G04 (kW/m) [47]

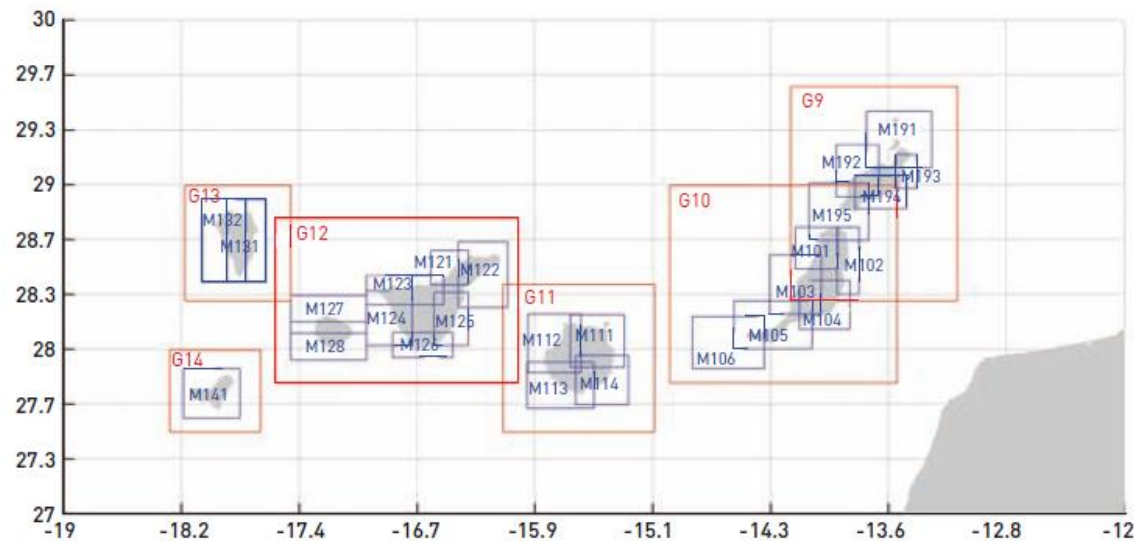


Figura 3-10 Malla de cálculo de las Islas Canarias [47]

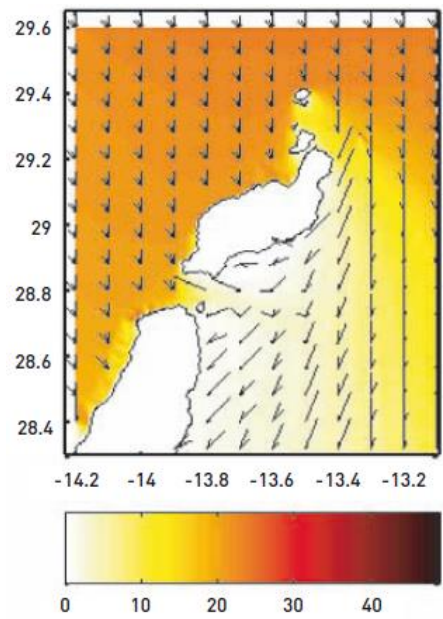


Figura 3-11 Potencia media en la malla de cálculo G09 (kW/m) [47]

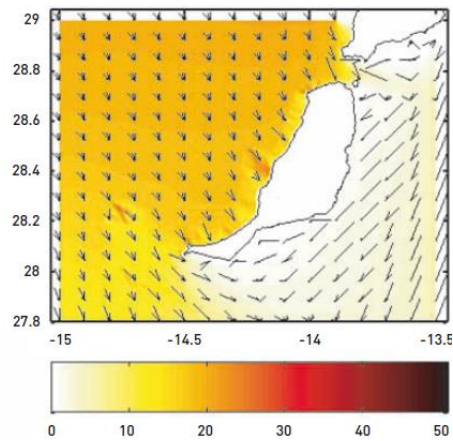


Figura 3-12 Potencia media en la malla de cálculo G10 (kW/m) [47]

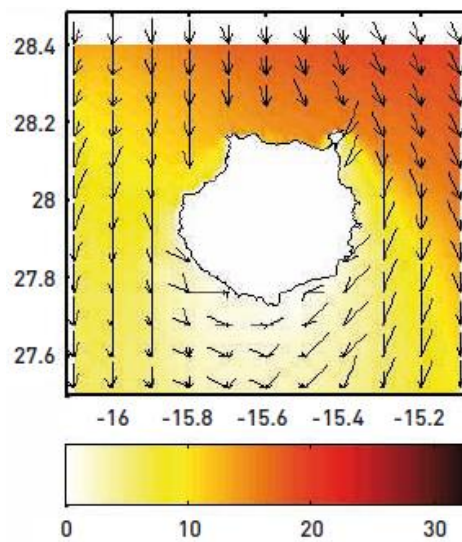


Figura 3-13 Potencia media en la malla de cálculo G11 (kW/m) [47]

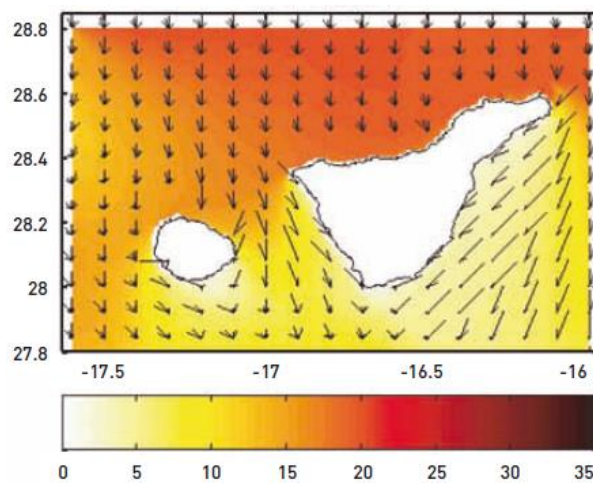


Figura 3-14 Potencia media en la malla de cálculo G12 (kW/m) [47]

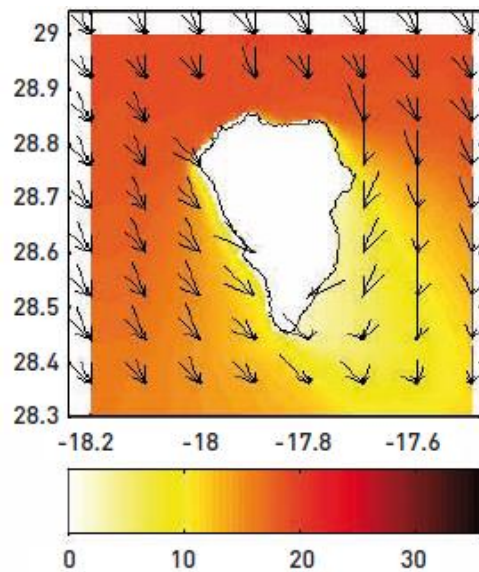


Figura 3-15 Potencia media en la malla de cálculo G13 (kW/m) [47]

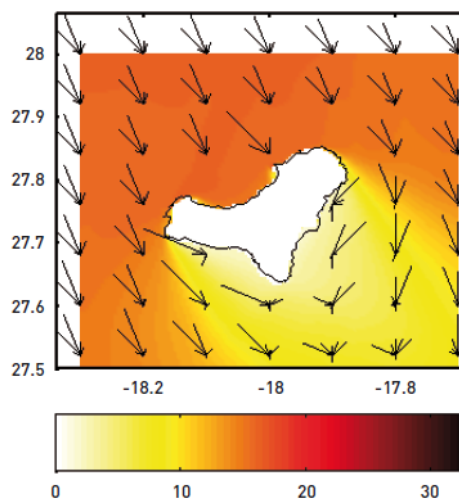


Figura 3-16 Potencia media en la malla de cálculo G14 (kW/m) [47]

A la vista de los resultado, se resuelve lo siguiente:

- Galicia presenta los valores de potencia energética más elevados, con potencias medias en profundidades indefinidas entre 40-45 kW/m.
- El Mar Cantábrico es, en segundo lugar, la siguiente zona del litoral en cuanto a recurso energético (alrededor de 30 kW/m disminuyendo de Oeste a Este).
- En tercer lugar, la fachada norte de las Islas Canarias (con 20kW/m).
- La fachada sur de las Islas Canarias, junto con el Mediterráneo español y el Golfo de Cádiz presentan valores medios anuales menores a 10 kW/m. [48].
- Los resultados obtenidos en profundidades indefinidas van disminuyendo progresivamente a medida que el fondo disminuye aunque en algunas áreas se producen concentraciones locales motivadas por la configuración de la costa y de la batimetría.

- Existencia de una fuerte estacionalidad en la potencia media, presentándose en invierno potencias medias de 75 kW/m (Galicia), 50 kW/m (Cantábrico) y 35 kW/m (Norte de Canarias).

3.3 Instalación de un sistema de energía undimotriz en España

3.3.1 Pasos para la instalación de una planta

Al tratarse de una tecnología emergente, cada planta tiene su cronología particular y no existe un protocolo de obligado cumplimiento. Sin embargo, existe una serie de pasos comunes que suelen seguir todos los proyectos de desarrollo de energía undimotriz y que a continuación se enumeran en orden cronológico:

- Diseño nominal y teórico del sistema de captación de energía marina.
- Construcción de un modelo a escala y pruebas del modelo en canales de experimentación o lugares para tal efecto.
- Construcción de un prototipo a tamaño real
- Prueba del prototipo en lugares adaptados para tal efecto (como por ejemplo, los estudiados en el punto 2.2: Zonas de experimentación en mar abierto).
- Estudio oceanográfico de la zona en la que se pretende instalar el WEC (vientos predominantes, altura, período y dirección de la ola).
- Elección de la zona en la que se instalará el sistema.
- Estudio del impacto medioambiental en la zona.
- Solicitud de permisos pertinentes.
- Estudio de viabilidad del proyecto.

3.3.2 Impacto medioambiental

La instalación de un sistema de captación de energía undimotriz, ya sea *inshore* u *off-shore* acarrea una serie de consecuencias desde el punto de vista medioambiental:

- Erosión de la costa: los dispositivos *inshore* o establecidos cerca de costa pueden provocar erosión de la costa debido a la alteración de corrientes y olas. Intensidad de la corriente y amplitud de la ola pueden provocar cambios en la costa en función del tamaño del dispositivo, mediante la deposición de sedimentos.
- Construcción del dispositivo: posible impacto durante la instalación y durante el fondeo de los aparatos. Esto es debido a que la gran mayoría de los sistemas de captación están fondeados usando bloques de cemento, anclas y cadenas. La preparación del fondo y el tendido de cables eléctricos altera el fondo marino.
- Impacto en la industria pesquera: la exclusión de ciertas zonas dedicadas para la obtención de energía puede afectar a las pesqueras locales. Además, la propia instalación de los dispositivos puede alterar la fauna marina.
- Impacto en el ecosistema marino: los mamíferos marinos son vulnerables a las estructuras flotantes, que pueden convertirse en barreras artificiales a la migración de estos mamíferos.
- Peligros a la navegación: en caso de no poder ser vistos o detectados por radar por las embarcaciones que naveguen por las cercanías de los dispositivos, éstos pueden ser un peligro para la navegación.

- Contaminación acústica: los sistemas de conversión de la energía producen ruido, si bien es cierto que a menor nivel que el que un barco podría provocar. Estos tipos de dispositivos están contruidos de materiales aisladores de ruidos.

España cuenta con un enorme recurso energético que en la mayoría de los casos es aprovechado, situándola a la vanguardia de las naciones europeas. No obstante, el recurso energético de la ola se encuentra hoy en día estancado. A continuación se estudiará por qué se considera la nación española idónea para tal fin.

3.3.3 Normativa nacional

El marco normativo de las energías renovables en España ha tenido lugar un importante desarrollo. La sociedad española actual, en el contexto de la reducción de la dependencia energética exterior, de un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles y de una mayor sensibilización ambiental, demanda cada vez más la utilización de las energías renovables y la eficiencia en la generación de electricidad, como principios básicos para conseguir un desarrollo sostenible desde un punto de vista económico, social y ambiental.

Además, la política energética nacional debe posibilitar, mediante la búsqueda de la eficiencia energética en la generación de electricidad y la utilización de fuentes de energía renovables, la reducción de gases de efecto invernadero de acuerdo con los compromisos adquiridos con la firma del protocolo de Kioto [49].

El punto de partida tuvo lugar con la promulgación de la ley 82/1980, sobre la conservación de la energía, tras la segunda crisis internacional del petróleo. Desde entonces, ha ido evolucionando un marco de apoyo sostenido a la implantación de estas fuentes de energía, permitiendo a las empresas promotoras y a los fabricantes disponer de inversores, colocando a las energías renovables españolas en puestos de cabeza en el concierto mundial. En diciembre del año 1999, se redactaba el Plan de Fomento de las Energías Renovables. El plan analizaba la situación y el potencial de estas energías y fijaba objetivos concretos para las diferentes tecnologías. En 2005, cuando se estaba alejando la posibilidad de cumplir ese objetivo, el Gobierno aprobó un nuevo Plan de Energías renovables 2005-2010, con la intención de aumentar la velocidad de cruce de implantación de estas fuentes y moderar el aumento de la demanda de energía.

Desde la última década, y especialmente desde 2005, la aportación de España en el ámbito de las energías renovables no ha dejado de crecer, arropadas por un marco regulatorio que ha aportado estabilidad a su desarrollo. A juzgar por los resultados obtenidos, puede decirse que la elección del modelo es, probablemente, la clave del éxito de las renovables para la generación eléctrica.

En el territorio nacional existen multitud de instalaciones de generación eléctrica en tierra, siendo la normativa que les sirve en cada caso de aplicación esencialmente autonómica. La novedad que aquí se presenta viene dada por el emplazamiento de las instalaciones de generación en el mar, por la ausencia de experiencias previas en dicho medio y por ser la competencia para su tramitación exclusivamente estatal. Quizá este motivo conlleva los procedimientos de autorizaciones y permisos para la ejecución de generación eléctrica en el mar, la pluralidad de Administraciones intervinientes y la diversidad de normativa que para estos casos resulta de aplicación, aconsejándose dictar una única norma que contemple en su totalidad dicho procedimiento.

Pasando ya a la materia que nos ocupa, el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo clasifica la energía marina, y más en concreto la undimotriz dentro del Grupo b.3: instalaciones que únicamente utilicen como energía primaria la geotérmica, la de las olas, la de las mareas, la de las rocas calientes y secas, la oceanotérmica y la energía de las corrientes marinas [49].

Por el Artículo 3 *Competencias administrativas*, Título I *Objeto, ámbito de aplicación y competencia* del Real Decreto 1028/2007, de 20 de julio, en relación con instalaciones de obtención de energía eléctrica marina,

1. Es competencia del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, a través de la Dirección General de Política Energética y Minas, como órgano sustantivo, otorgar la autorización administrativa para la construcción, ampliación, modificación y cierre de las instalaciones
2. Es competencia del Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Dirección General de Costas, otorgar las autorizaciones y concesiones de ocupación del dominio público marítimo-terrestre precisas para la instalación de un parque de generación eléctrica marino.
3. El Ministerio de Medio Ambiente actuará como órgano ambiental en las evaluaciones ambientales que se efectúen en la aplicación de este real decreto.
4. Es competencia del Ministerio de Fomento, a través de la Dirección General de Marina Mercante, autorizar las actividades precisas para la realización del objeto de este real decreto cuando afecten a la seguridad marítima, a la navegación y a la vida humana en la mar.
5. En caso de ocupación del dominio público portuario, la autoridad portuaria competente otorgará la correspondiente autorización o concesión, de conformidad con lo dispuesto en la legislación sectorial aplicable
6. Es competencia del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación la adopción de las medidas de protección y regeneración de los recursos pesqueros.

Dichas competencias serán ejercidas sin perjuicio de las que estuvieran legalmente atribuidas a otros órganos de la Administración.

Por el Artículo 32. *Otras tecnologías de generación marinas*. del Título III *Procedimientos administrativos para otras tecnologías de generación marinas*, para las autorizaciones y concesiones administrativas precisas para la construcción y ampliación de las instalaciones de generación de electricidad de origen renovable que se encuentren ubicadas físicamente en el mar territorial y de tecnología diferente a la eólica, se establece un procedimiento simplificado que comienza con la solicitud de autorización administrativa regulada en el artículo 24 del Real Decreto 1028/2007 de 20 de julio.

En la disposición adicional segunda del mismo artículo *imposibilidad de autorización en determinadas zonas*, no podrá otorgarse ninguna de las autorizaciones reguladas por este real decreto en las zonas definidas en artículo 5 (extensión de superficie definida entre dos paralelos y dos meridianos, cuya separación sea de un grado, que deberá coincidir con grados y minutos enteros) que se encuentren situadas:

- a) En aquellas en las que existan dispositivos de separación del tráfico marítimo, ni en sus zonas aledañas.
- b) En los accesos a los puertos de interés general o a zonas en las que existan terminales de carga o descarga, refinerías factorías químicas y petroquímicas, o instalaciones para el almacenamiento y distribución de productos químicos o petroquímicos o de combustibles sólidos.
- c) En las zonas a evitar por los buques en tránsito a la altura de las Islas Canarias, contenidas en la Resolución OMI/MEC 134 (53) de 22 de julio de 2005, o en las que puedan sustituir a éstas [50].

3.3.4 En relación al recurso energético

Como se aprecia en el punto 3.2.2 : *Resultados*, España goza de altas posibilidades para la obtención de energía marina. Son necesarios una serie de requisitos para la instalación de dispositivos de captación de energía marina.

Uno de ellos, y quizá el más importante, es poseer recurso undimotriz u olamotriz. Europa y más en concreto España (Figura 3-17 Distribución mundial media del recurso energético olamotriz (kW/m)) son zonas de gran concentración de recurso undimotriz.

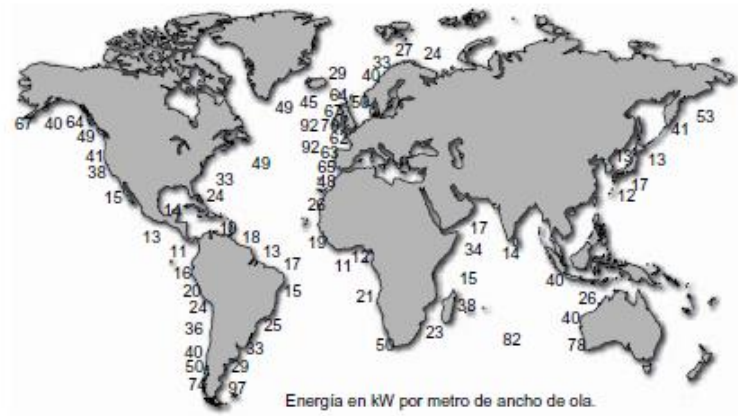


Figura 3-17 Distribución mundial media del recurso energético olamotriz (kW/m)

Dentro del continente europeo, Escocia, España, Gran Bretaña y Portugal son países que gozan especialmente del recurso de la ola, siendo el primero el país pionero y más avanzado, al haber desarrollado múltiples prototipos. Portugal no se queda atrás en el ámbito de la energía undimotriz. Su costa y las aguas de las Islas Azores se encuentran entre las zonas del mundo con mayor potencial de la energía de las olas. Es por esta razón que Portugal se está convirtiendo en uno de los países más activos en el aprovechamiento energético de la ola.

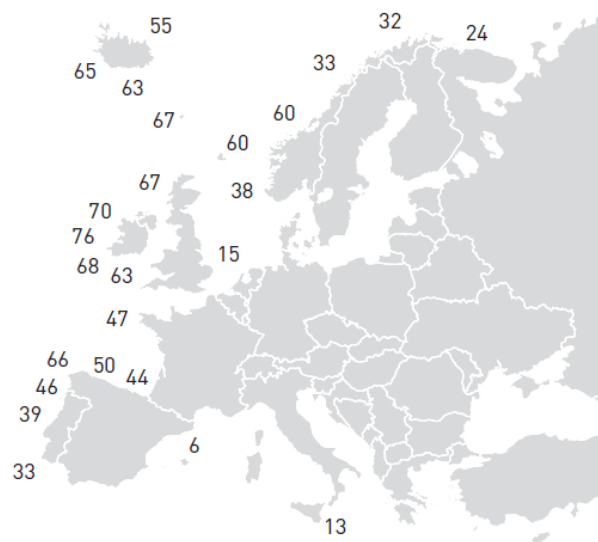


Figura 3-18 Distribución europea media del recurso energético olamotriz (kW/m) [36]

Como se puede observar en la Figura 3-18 Distribución europea media del recurso energético olamotriz (kW/m) la costa Cantábrica es especialmente idónea dentro del marco nacional. También lo son aguas que bañan las Islas Canarias, donde diversos proyectos, como *WELCOME* e *INNPACKTO WAVE ENERGY* entre otros han sido desarrollados.

Se ha escogido, más en concreto, la costa de Gijón para la instalación de la hipotética planta de energía olamotriz. Se dispone de los datos oceanográficos específicos de esa zona gracias a una boya fondeada para tal efecto. La boya es la *Gijón II*, situada en posición latitud 43,613° N y longitud 5,667° W, perteneciente a la red OPPE Costera (Organismo Público de Puertos del Estado). Se encuentra fondeada en una sonda de 43 metros de profundidad y a unas 2,5 millas náuticas de costa [51].



Figura 3-19 Situación de la boya de obtención de datos meteorológicos Gijón II.



Figura 3-20 Detalle de carta náutica de la situación de la boya [51]

Esta boya es capaz de obtener datos como los que se muestran a continuación:



Figura 3-21 Altura significativa de la ola (m) [36]

Tal y como se puede observar en la Figura 3-21 Altura significativa de la ola (m) , la altura significativa media toma valores comprendidos entre 1 y 3 m, y por lo tanto, según la Tabla 3-1, correspondería a los estados de la mar 3, 4 y 5 (marejada, fuerte marejada y mar gruesa).

En cuanto al período de la ola, éste abarca valores que oscilan entre los 5 y los 7 segundos de media (Figura 3-22 Período significativo de la ola (s)).

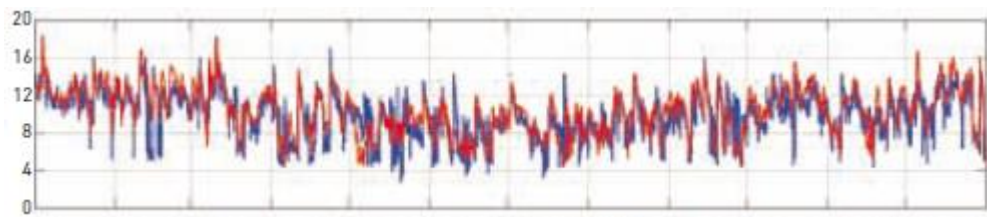


Figura 3-22 Período significativo de la ola (s) [36]

En lo que a la dirección de la ola respecta, en la mayor parte de los casos, esta suele aproximarse a costa desde el norte (Figura 3-23 Ángulo de dirección de la ola

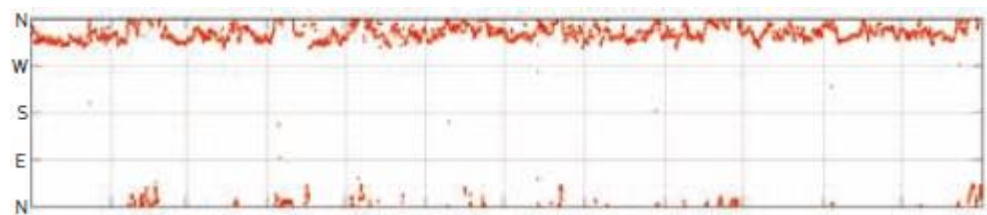


Figura 3-23 Ángulo de dirección de la ola [36]

Finalmente, la boya Gijón II proporciona datos relativos a la potencia (kW/m) que la ola transmite (Figura 3-24 Potencia transmitida por la ola

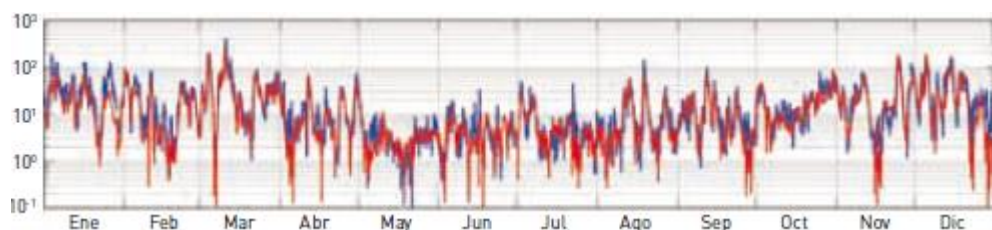


Figura 3-24 Potencia transmitida por la ola [36]

Otro de los factores clave para la eficacia de las plantas de captación de energía marina, es que estén situadas en zonas óptimas en el sentido orográfico. Esto es, las olas, cuando se acercan a aguas poco profundas van perdiendo gradualmente su potencia. Ello se debe a la fricción que se produce entre las partículas de agua más profundas y el fondo del mar, siendo el efecto más significativo cuando la profundidad del agua es menor de $L/4$. Esta pérdida de potencia es muy importante, ya que reduce la cantidad de energía útil que puede extraerse del oleaje [17]. Por ello, la Costa Cantábrica es idónea para la ubicación de plantas, pues su costa no acaba en playa, sino que acaba en acantilados. Esto impide que las sondas disminuyan de forma gradual y lo hagan con mayor gradiente cerca de costa y exista poca diferencia de sonda a pocos kilómetros de la misma, lo que provoca que el rozamiento sea mínimo y, por ende, también las pérdidas.

Una de las principales barreras para la instalación en España la inversión que conllevaría en la actualidad instalar una planta undimotriz. La viabilidad de los sistemas de captación de energía marina por medio de las olas es cuestión de tiempo y que el Estado Español invierta en este tipo de energía.

3.3.5 Conexión a la red

Es necesario transportar la energía desde el parque de olas de donde se obtiene hasta la estación o planta situada en tierra. Además, es imprescindible adaptar los valores de tensión y frecuencia a los de la red.

Los sistemas de transporte más extendidos entre los sistemas de captación de energía marina (incluyendo energía eólica marina) son los siguientes:

- Transporte por cable: efectivo hasta distancias de 100 km, existen cableados submarinos de hasta 260 km. Los cables deben ser dimensionados para soportar la corriente que transportan, además de la presión del agua y movimiento giratorios de más de 45 grados.

- Transporte por transmisión hidráulica: en el que se utiliza agua salada o agua dulce como fluido de transporte. Presenta la gran ventaja de que el equipo eléctrico (que incluye la turbina) se encuentra situado en costa, lo que facilita el mantenimiento. Este tipo de transmisión la utilizan plantas como de presión osmótica o energía azul, o dispositivos como el *Oyster* [30].

3.3.6 Costes del uso de la energía de la ola

Quizá es cierto que el coste de la energía undimotriz, por encontrarse en plena fase de desarrollo, es más alto que el de otras tecnologías renovables y, por ello, no es competitivo con el coste de ninguna central convencional, pero se espera que, para los próximos años (2020-2030), el coste de generación de energía a partir de las olas, se estabilice e iguale al de otras fuentes de energía. Los puntos críticos que influyen directamente en los costes de esta tecnología son:

- Los sistemas o prototipos se enfrentan al reto de probar su eficiencia en el mar con resultados contrastables en el tiempo.
- El coste de inversión final es mayor de lo previsto en muchos casos.
- Las horas de funcionamiento reales no se cumplen por problemas de mantenimiento.
- Los dispositivos no sobreviven en el mar en condiciones reales.

La inmadurez de la tecnología undimotriz implica que la inversión en el sistema de captación sea mayor de lo previsto, las horas de funcionamiento reales no se cumplan por problemas de mantenimiento y los dispositivos no sobrevivan en el mar ante las condiciones reales en el mar.

Para el estudio de la inversión y coste que implicaría instalar un sistema, se hace uso del factor LCE (Levelized Cost of Electricity), que viene dado por la expresión:

$$LCE = \frac{\text{coste total durante período } t}{\text{electricidad producida durante período } t}$$

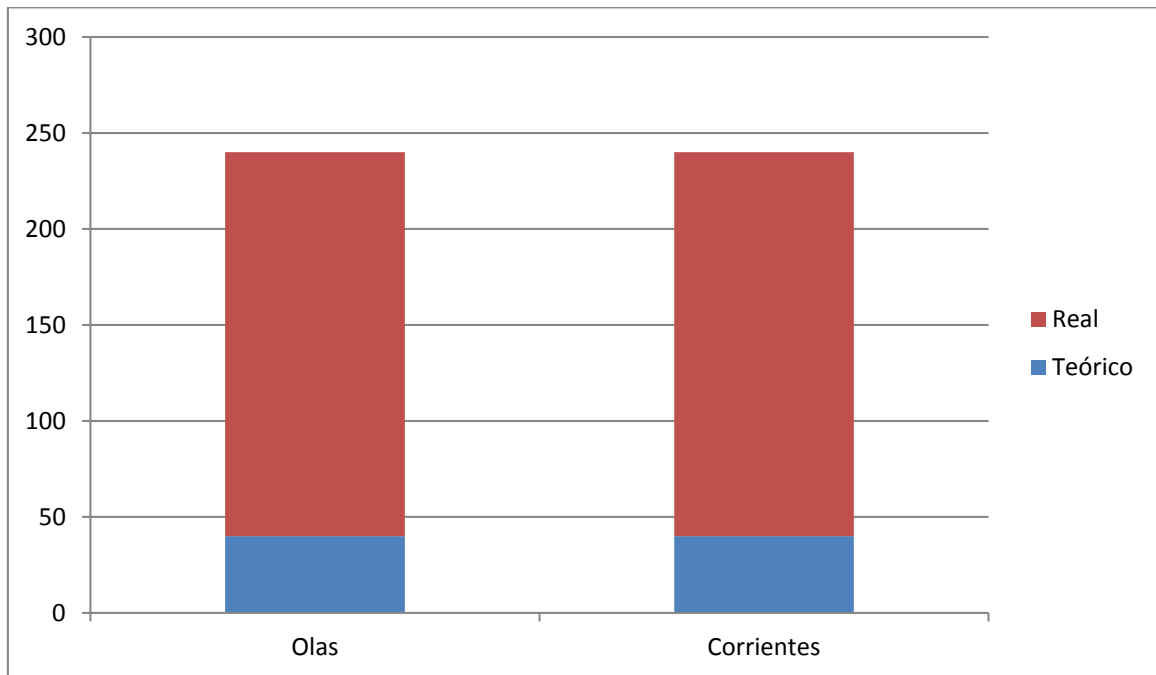


Tabla 3-2 Coste (LCE, c€/kWh) teórico y real de electricidad en instalaciones de energías del mar.

Como se puede apreciar en la Tabla 3-2, los costes reales superan con creces los costes teóricos. El momento en que las plantas de energía de las olas sea rentable llegará cuando los costes reales derivados de los problemas de instalación y de diseño, se igualen con los costes teóricos. Como se observa, los costes medios teóricos de plantas de energía undimotriz y de la corriente son prácticamente idénticos.

Comparando el precio medio desglosado de cada subelemento que compone la instalación y funcionamiento de sistemas de olas y de corriente, se obtiene la Tabla 3-3:

Subelemento	Ola (M€/MW)	Corrientes (M€/MW)
Mecánica/eléctrica/sistemas	1,57	1,44
Conexionado cable	1,41	1,41
Estructura	1,3	1,40
Logística	0,38	0,38

Diseño e ingeniería	0,29	0,29
Fondeos	0,22	0,27
Gestión proyecto	0,15	0,23
Total	5,3	5,41

Tabla 3-3 Distribución del CAPEX (Capital Expenditures) desglosado de planta undimotriz y de corriente [36]

En la actualidad, no existen –salvo alguna excepción- plantas comerciales instaladas, ni se espera su instalación a corto-medio plazo. Sí es factible, en cambio, la disponibilidad de plantas de pequeña escala que aporten energía a su red.

Un importante avance se está gestando en el ámbito de las energías renovables en España por medio de la promulgación de los Reales Decretos 1028/2007, de 20 de julio y 667/2007, de 20 de mayo. Este avance viene marcado por una serie de fases o hitos (Tabla 3-4 Evolución del LCE por años):

- Confirmación de la fiabilidad (2010-2015), en el que se comprobó y logró avances en la tecnología, modelos de simulación y prototipos que permiten desarrollar sistemas con capacidad comercial.
- Despegue de la tecnología (2016-2020): fase actual. Los modelos diseñados han de ponerse en marcha durante esta etapa. Se pueden alcanzar los 21-33 c€/kWh.
- Fase de consolidación de la tecnología (2021-2030): el despliegue de la curva permitirá a la tecnología recorrer la curva de experiencia. Se podría alcanzar costes de generación del orden de 5 a 15 c€/kWh en función del grado de solidez de la curva de experiencia.

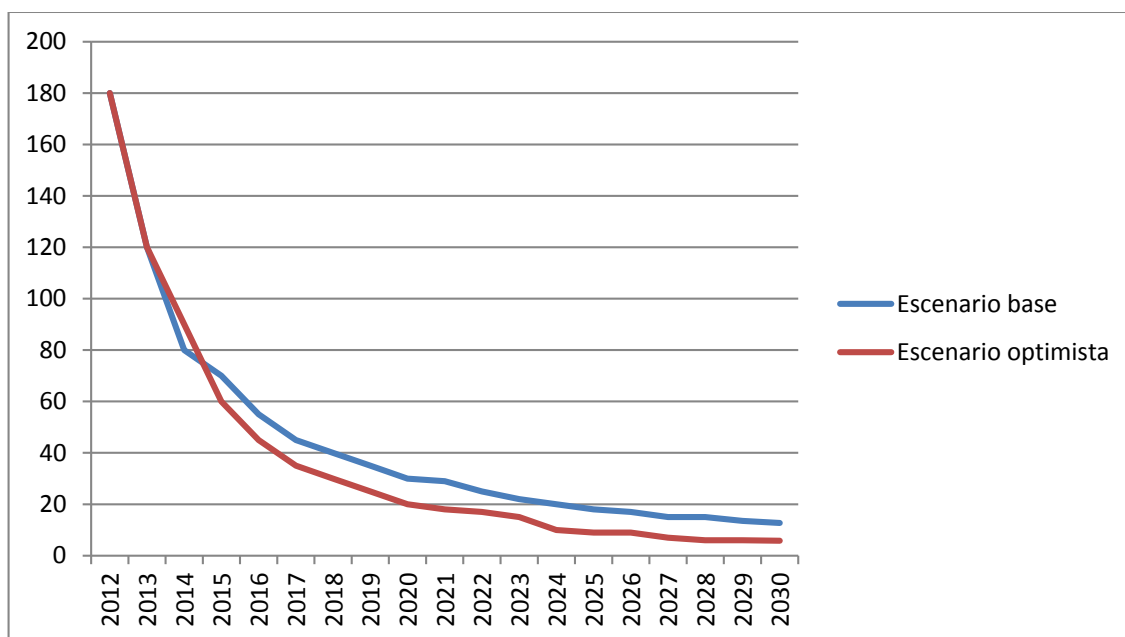


Tabla 3-4 Evolución del LCE por años

Una vez se alcance la fase de consolidación de la tecnología (2021-2030), los costes de inversión disminuirán hasta 2-3 M€/MW en 2020 y, siendo optimistas, 0,75-2 M€/MW en 2030, frente a los más de 5M€/MW que supone en la actualidad (Tabla 3-3 Distribución del CAPEX (Capital Expenditures) desglosado de planta undimotriz y de corriente). Entre las mejoras tecnológicas en este período se incluyen: diseño de plantas más fiables, mejores estructuras y sistemas mecánicos y eléctricos, mejor conexionado y desarrollo de técnicas de fondeo e instalación de plantas.

Por otro lado, se espera una reducción de hasta el 25% de costes de operación y mantenimiento, que suponen entre 30 y 52 M€/MW/año. Esta reducción vendrá dada por el desarrollo de componentes especializados y potenciales sinergias junto con eólica *off-shore*, de sistemas de seguimiento y monitorización, y por el incremento de fiabilidad de las plantas.

3.3.7 Instalación de un oscilante vertical en la costa Cantábrica

Se ha escogido la costa Cantábrica por reunir los requisitos imprescindibles para la instalación de un dispositivo WEC, como se verá más adelante. Se ha seleccionado como ejemplo para saber cuánta energía podría extraerse el dispositivo un oscilante vertical tipo *PowerBuoy*, diseñado por *Ocean Power Technologies*.

Teniendo en cuenta la expresión de la potencia dada en el punto 3.1.2: *Potencial energético de la energía undimotriz*, la potencia media ejercida por una ola puede determinarse según la siguiente expresión:

$$P_s = 0,49H_s^2T_s$$

Donde H_s es la altura significativa y T_s es el período significativo. Sustituyendo en la expresión con los datos reflejados en el punto 3.3.4: *En relación al recurso energético*, se obtiene que la potencia media en la zona analizada es:

$$P_s = 0.49 \cdot 2.5^2 \cdot 6 \approx 18.5 \text{ kW/m}$$

Cabe reseñar que los 18,4 kW/m es un valor medio, susceptible a cambios así como dependiente de la época del año de la que se trate. Así pues, para el mes de marzo, con valores pico de $H_s = 7.5$ m, y períodos de ola de 18 segundos, se obtendría:

$$P_s = 0.49 \cdot 7.5^2 \cdot 18 \approx 496 \text{ kW/m}$$

Igualmente, en meses de menos actividad undimotriz, como puede ser el mes de mayo, se obtiene $H_s = 0.5$ m y $T_s = 6$ s, dándose, de esta forma, una potencia por metro de frente de ola de:

$$P_s = 0.49 \cdot 0.5^2 \cdot 6 \approx 0.74 \text{ kW/m}$$

Como se puede apreciar, la diferencia de potencia obtenida varía de forma cuantiosa entre una época del año y otra.

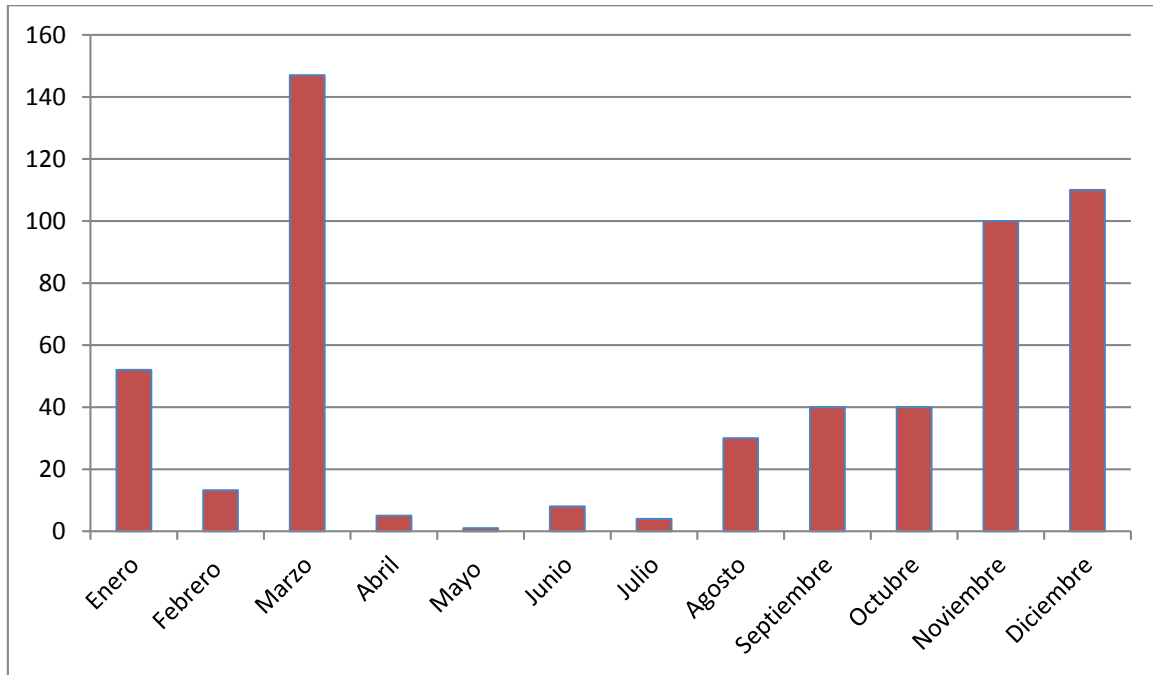


Tabla 3-5 Potencia media por meses (kW/m)

Si realizamos la media aritmética de la potencia de la ola, se obtiene la siguiente expresión:

$$\sum_{i=0}^{12} 0.49 \cdot H_{s_i}^2 \cdot T_{s_i} \approx 46 \text{ kW/m}$$

Las características técnicas de la PowerBuoy relacionadas en la Tabla 3-6 establecen que la boya fue diseñada para trabajar y producir energía con estados de la mar comprendidos entre el 1 y el 5, alturas similares a las presentes en la zona estudiada (entre 0 y 4 metros de altura de ola, según la Tabla 3-1), siendo capaz, en esas condiciones, de producir hasta 7200 Wh/día.

Altura	12.8 m
Diámetro del flotador	2.7 m
Peso	10000 kg
Profundidad mínima	25 m
Profundidad máxima	1000 m
Estados de la mar	1-5

Tabla 3-6 Parámetros de la PowerBuoy [52]

4 DISEÑO DE UN WEC

Uno de los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado era la propuesta preliminar de diseño de un sistema de captación de energía marina. Para ello, se hizo uso del software de simulación CAD (Computer- Aided Design) Siemens NX (más concretamente la versión 10.0), por ser el más completo en el ámbito de la simulación y, a su vez, permitir una fácil visualización y comprensión del movimiento y componentes del WEC, tanto para el alumno como para evaluadores.



Figura 4-1 Software de simulación CAE Siemens NX

4.1.1 Método de diseño empleado

A la hora de realizar el diseño, es necesario tener en cuenta que existen diversos métodos para entender y obtener datos resultantes del movimiento, ya sea de la ola, de una boya con la ola o del movimiento relativo de varias boyas bajo el movimiento realizado por la ola.

	Analítico	Morrison	Dominio frecuencial BIEM	Dominio temporal BIEM	NSEM
Viscosidad	No	Sí	No	No	Sí
Interacción ola/cuerpo	Linear	El movimiento del cuerpo no tiene efecto en las olas	Apenas lo tiene en cuenta	No lo tiene en cuenta	No lo tiene en cuenta
Ruptura de la ola	No	No	No	No	No

Precisión	Aceptable	Aceptable	Buena	Buena	Muy buena
Exactitud en la resonancia	Poco aceptable	Aceptable	Poco aceptable	Aceptable	Muy buena

Tabla 4-1 Características de los diferentes modelos hidrodinámicos [53]

Para el estudio de la respuesta de la boya en el medio marino, se empleó el modelo analítico, ya que, con una precisión aceptable y teniendo en cuenta una interacción lineal entre ola y cuerpo flotante, es relativamente fácil tratar con los medios de que se disponía para la realización del Trabajo de Fin de Grado. Además, la curva de aprendizaje del resto de los modelos y el tiempo de simulación requerido en algunos de ellos, los hacen menos viables para su aplicación en el presente trabajo, por lo que directamente fueron descartados.

4.2 Simulación de movimiento realizado por una sola boya

Para el desarrollo de este apartado, es importante reseñar que se diseñó, en primer lugar una sola boya que, siendo atacada por una ola de ciertas características, realizaría un movimiento sinusoidal. Antes de diseñar el diseño propuesto, se procedió a diseñar una sola boya para estudiar su movimiento tras el paso de la ola por ella.

4.2.1 Simulación de una boya en movimiento

Un cuerpo flotante tiene seis grados de libertad. Para el desarrollo del presente apartado, se ha simplificado hasta tener en cuenta únicamente el movimiento vertical de la boya, o lo que la AENOR define como movimiento de arfada, abreviando así los cálculos y, por lo tanto, los resultados.

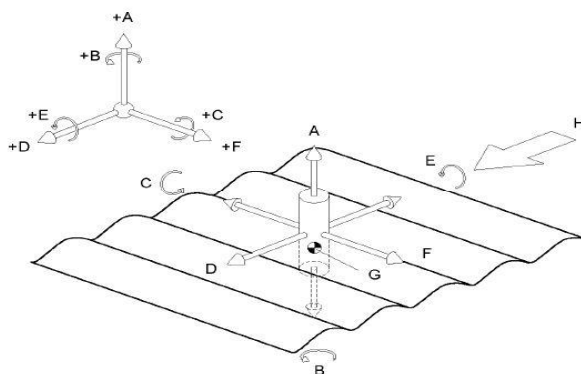


Figura 4-2 Seis grados de libertad. [58]

- A: Arfada;
- B: Guiñada;
- C: Cabeceo;

- E: Balanceo;
- F: Vaivén;
- G: Centro de gravedad;
- H: Energía incidente del recurso.

Considérese una boya de forma cilíndrica en medio del mar. Si una ola sinusoidal con una determinada frecuencia ω_j ataca a la boya, ésta experimentará un movimiento armónico amortiguado. La relación entre la frecuencia de la ola y la frecuencia natural de la boya ω/ω_j , determinará la amplitud y la fase del movimiento experimentado.

Si el cuerpo es desplazado de su posición de equilibrio una distancia Δz , éste experimentará una fuerza ΔF , que variará en función del volumen de cuerpo sumergido. Esta fuerza, por lo tanto, será [54]:

$$\Delta F = -\rho g \pi r_j^2 \Delta z = -k_j \Delta z$$

$$k_j = -\frac{\Delta F}{\Delta z} = \rho g \pi r_j^2$$

Para un cuerpo de forma cilíndrica constante, la frecuencia natural ω_j puede expresarse mediante:

$$\omega_j = \sqrt{\frac{k_j}{m_j}} = \sqrt{\frac{\rho g \pi r_j^2}{m_j}}$$

Donde k_j se conoce como constante de rigidez y m_j como la masa del cuerpo. Si se tiene en cuenta el principio de Arquímedes: *‘un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, recibe un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del volumen del fluido que desaloja’*. Esto es, el peso del cuerpo que flota debe ser igual al peso del volumen de agua desplazada. De esta manera, para un cuerpo cilíndrico el volumen desplazado es el producto de su calado T_j y su área πr^2 .

$$m_j = \rho V_j$$

$$V_j = \pi r_j^2 T_j$$

De esta forma, se puede deducir la expresión de la frecuencia natural del cuerpo (cilíndrico):

$$\omega_j = \sqrt{\frac{\rho g \pi r_j^2}{\rho \pi r_j^2 T_j}} = \sqrt{\frac{g}{T_j}}$$

De donde se puede extraer que la frecuencia natural del objeto en cuestión tan sólo depende del calado del mismo.

Para que una boya oscile a la misma frecuencia que la ola, y pueda experimentar el máximo de energía posible, es necesario que la frecuencia de la ola ω y la frecuencia natural de la boya ω_j sean iguales, o lo que es lo mismo, $\omega/\omega_j \approx 1$.

La fuerza que experimenta una boya que es acatada por una ola viene dada por la expresión dinámica:

$$f_c = Ma + Cv + Kx$$

En la que M es la masa del cuerpo, a es la aceleración experimentada, C es el coeficiente de amortiguación, v es la velocidad, K es la constante de rigidez y x es la posición. El coeficiente de amortiguación C se obtiene a partir de la suma $c + c_{gen} + c_{loss}$, donde c es el coeficiente de amortiguación del cuerpo en el fluido (agua en este caso), c_{gen} es el coeficiente extraído del PTO y c_{loss} es el coeficiente de pérdidas. Para una primera aproximación al movimiento, tan sólo se tendrá en cuenta el coeficiente de amortiguación c , despreciando tanto el amortiguamiento debido a la extracción de potencia del PTO, así como el coeficiente de pérdidas.

Tal vez, lo más complejo a la hora de estudiar el movimiento de un cuerpo flotante en un fluido, sea la obtención de dichos parámetros o coeficientes.

4.2.2 Movimiento oscilatorio amortiguado

Para entender el caso anteriormente expuesto, desde un punto de vista físico, se entenderá el movimiento de la boya como un movimiento oscilatorio amortiguado.

El movimiento de una ola puede parecer un movimiento oscilatorio simple. No obstante, si fuese oscilatorio simple, la boya realizaría un movimiento sinusoidal incesantemente. Las fuerzas que hacen que el movimiento cese son lo que se conoce como fuerzas no conservativas, representadas en el caso de las olas por fuerzas de rozamiento de la naturaleza (con el aire y con el propio fluido).

Dicha simulación consiste en una boya a la que se le obliga a realizar un movimiento con un resorte, que representa la variación del empuje, y un amortiguador, que simula la fuerza de arrastre viscoso debido al movimiento de un cuerpo dentro del agua. Este movimiento puede parecer sinusoidal. No obstante, se trata de un movimiento oscilatorio amortiguado, provocando, así, que las oscilaciones se frenen por la actuación de fuerzas no conservativas.

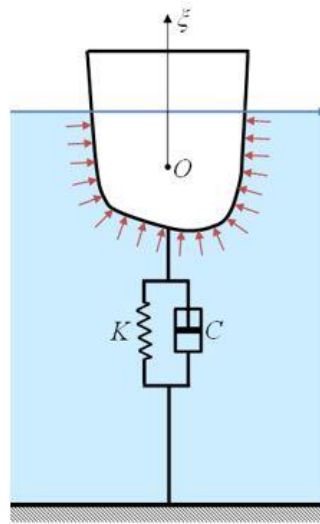


Figura 4-3 Esquema de una boya experimentando un movimiento oscilatorio amortiguado

En un movimiento oscilatorio, la fuerza restauradora del resorte viene determinada por la Ley de Hooke:

$$F_y = -kx$$

Siendo k la constante de restauración del muelle.

Por otro lado, la fuerza de amortiguamiento se puede representar por la siguiente expresión:

$$F = -bv$$

Donde b es el coeficiente de amortiguamiento y v es la velocidad de la partícula. Cuanto más grande sea la constante b , la amplitud de la oscilación disminuirá con más asiduidad.

Teniendo ambas fuerzas presentes y estudiando el conjunto de fuerzas en la misma coordenada (arriba), se obtiene:

$$\sum F_y = -kx - bv_y = ma_y$$

En cuanto a la simulación en Siemens NX, se optó, como se verá más tarde, por hacer un análisis partiendo de datos ya existentes acerca de las dimensiones y coeficientes de amortiguación debido al movimiento de la boya dentro del agua. Así pues, se detallan a continuación los siguientes datos [55]:

Parámetros	
Calado de la boya	2.5 m
Diámetro de la boya	2.5 m
Radio de la boya	1.25 m
Densidad del agua	1000 kg/m ³
Peso de la boya	12272 kg
Altura de ola	2.5 m
Frecuencia de ola	1.257 rad/s
Diámetro de la base	3.75 m
Área de la base	6.135 m ²
Profundidad de la base	0.625 m

Tabla 4-2 Parámetros de la boya y de la ola [55]

Se procedió, por lo tanto, a simular la reacción de una boya frente a una ola. Para la primera simulación no se tuvo en cuenta más que el movimiento de la ola frente a la boya. Es importante remarcar que, en la simulación, se consideró que la longitud de onda de la ola es mucho más grande que la boya en sí, por lo que se simplificaron los cálculos y se trató la ola como un plano al que se obligó a realizar un movimiento armónico con las características de la Tabla 4-2 Parámetros de la boya y de la ola. Se simuló el comportamiento de una única boya en presencia de una ola sinusoidal, con amplitud 2.5 m y frecuencia 1.257 rad/s.

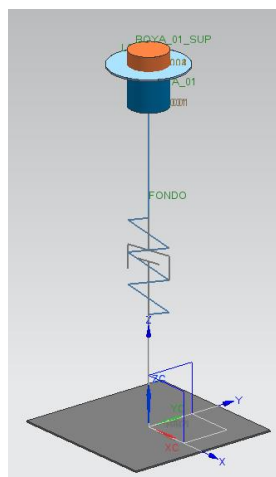


Figura 4-4 Simulación de una boya en Siemens NX

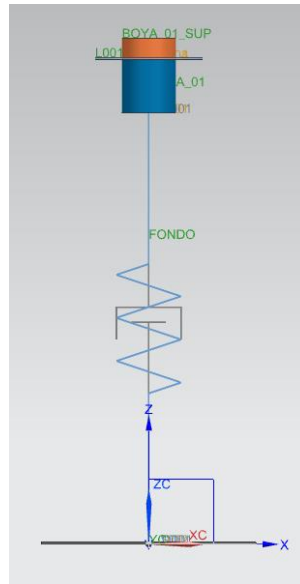


Figura 4-5 Vista de alzado de la simulación en Siemens NX

Para simular el movimiento de la ola, se han tenido en cuenta las fuerzas presentes en el movimiento de la boya, tales como la fuerza ejercida por el propio peso de la boya, el coeficiente de amortiguación, o el empuje característico del agua sobre la boya.

De esta manera, se ha simulado el empuje de la ola que representa la variación de la fuerza vertical cuyo valor se modifica en función del volumen de carena sumergido bajo la ola, ya que el empuje varía según la cantidad de volumen del cuerpo sumergido. Además, el software permite introducir directamente la masa de la boya, centro de gravedad o momentos de inercia permitiendo la posibilidad de ampliar el estudio si fuese necesario. Para este caso, sólo se tendrán en cuenta fuerzas verticales, limitando el movimiento al eje z de manera que no existirán momentos ni giros en ningún eje.

4.3 Simulación de un movimiento entre dos boyas

Una vez simulado el movimiento de una boya cilíndrica, el análisis se amplía a estudiar el movimiento entre dos boyas (que denominaremos flotador y mástil) con la idea de maximizar el movimiento relativo entre ambas. De esta manera, introduciendo un sistema de extracción de energía entre ambas, nos aseguramos que la potencia extraída de ese movimiento relativo sea máxima

Como además, flotador y mástil poseen distintas frecuencias naturales, es lógico pensar que ambas relaciones con la frecuencia de la ola serán distintas. Así pues, al atacar la ola al conjunto, flotador y mástil experimentarán un movimiento distinto, permitiendo que, para una determinada frecuencia de ola, el movimiento relativo entre mástil y flotador dé lugar a que se pueda extraer potencia de él según la expresión:

$$P(\omega) = \frac{1}{2} \omega^2 c_g |\xi_{1/2}|$$

Donde c_g es el coeficiente de amortiguación del generador y $|\xi_{1/2}|$ es la diferencia de posición entre flotador y mástil.

4.3.1 Diseño del sistema de captación

Se conoce como PTO (Power Take-Off) al elemento que, situado entre las dos boyas o elementos flotantes se encarga de obtener potencia eléctrica a partir del movimiento entre éstas. Para ello, principalmente por la facilidad de diseño y para la obtención de potencias teóricas, se procedió a modelar en Siemens NX un eje dentado de mecanismo cremallera-piñón.

Además de esta sencillez a la hora de diseñar, la principal ventaja de este tipo de mecanismo es el poco mantenimiento porque se requieren pocas piezas para su montaje y funcionamiento. Además, actuadores que permiten mayores sobrecargas desde el punto de vista energético, como pueden ser los hidráulicos se caracterizan por necesitar para su uso fluidos, potencialmente contaminantes.

a) *Diseño simple*

Así pues, se procedió al diseño de las partes que componen el PTO del sistema de captación. En primer lugar se diseñó una boya dotada con una cremallera a lo largo de su estructura.

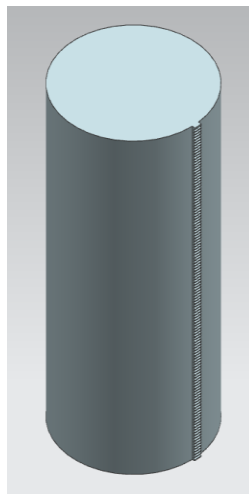


Figura 4-6 Boya con cremallera

En segundo lugar, se diseñó la boya en la que se situaría la rueda dentada a partir de la cual se obtendría la energía resultante del movimiento relativo entre las dos boyas.

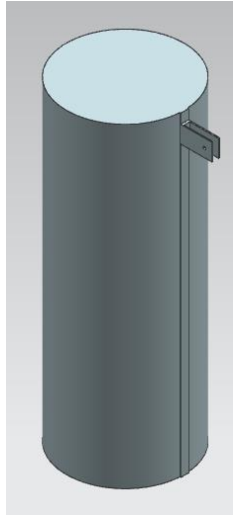


Figura 4-7 Boya cuyo cometido es alojar la rueda dentada

Por otro lado, se diseñó la rueda dentada y el pasador con el que se fijaría a la boya.

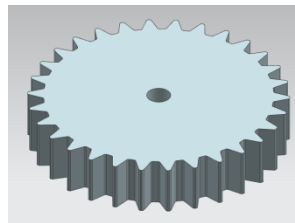


Figura 4-8 Rueda dentada

Con todos los elementos diseñados y ensamblándolos, se obtiene:

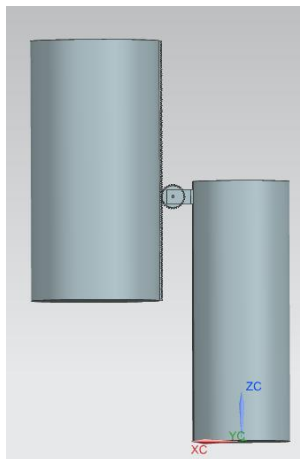


Figura 4-9 Ensamblado de las dos boyas

b) Diseño con una estructura exterior

Uno de los problemas que presenta el modelo anteriormente diseñado es la falta de estabilidad que presenta. Para ello, se cambió el diseño original optando por una estructura exterior compuesta por cuatro boyas unidas entre sí (Figura 4-10). La idea sería situar la boya central (o mástil) centrada en la estructura (Figura 4-11). Además, la boya central, en lugar de constar de una sola cremallera, se le dotó de dos cremalleras a ambos lados del cilindro, optimizando así la energía captada del movimiento relativo entre las dos boyas y repartiendo simétricamente el par de frenado introducido por el PTO. Por otro lado, para impedir que la boya central realizase otro movimiento además del movimiento vertical del que se extraería la potencia, se diseñó una guía vertical a lo largo del mástil que se acoplaría a la otra parte de la guía, presente en la estructura. Se obtiene, así, un conjunto estructura-mástil en el que sólo es posible realizar el movimiento vertical. La principal ventaja de restringir el movimiento del mástil a únicamente vertical es que se impide que cremallera y rueda dentada se desacoplen durante el movimiento entre los dos cuerpos, algo que sí ocurría con el diseño anterior.

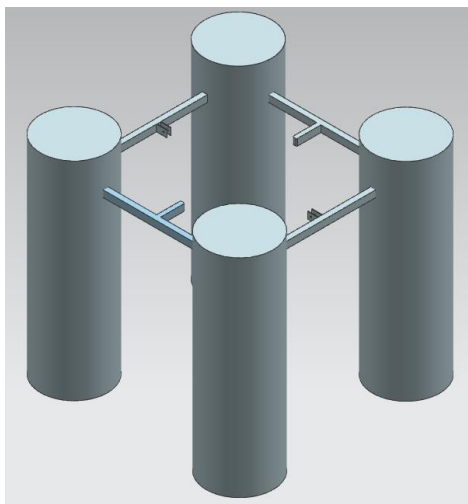


Figura 4-10 Flotador compuesto de cuatro boyas unidas entre sí

En cuanto a la boya central o mástil, su diseño sería el siguiente:

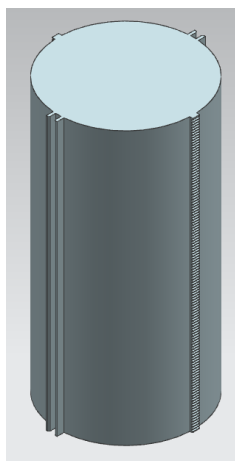


Figura 4-11 Boya central o mástil

El conjunto flotador-mástil tendrá, por lo tanto, la siguiente apariencia:

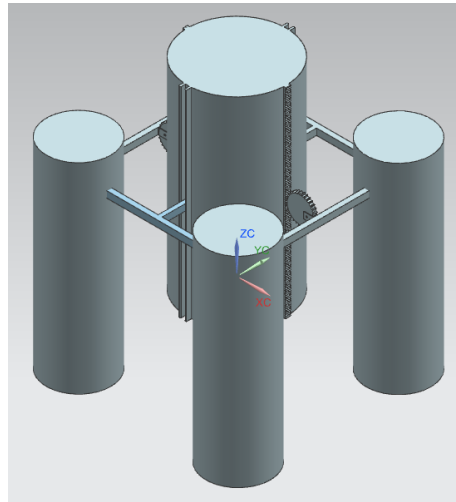


Figura 4-12 Ensamblajes flotadores-mástil

c) *Diseño con estructura exterior y mástil de volumen variable*

Como se vio en el apartado 4.3: *Simulación de un movimiento entre dos boyas*, la potencia extraída del movimiento relativo entre dos boyas viene dada por la expresión:

$$P(\omega) = \frac{1}{2} \omega^2 c_g |\xi_{1/2}|$$

Donde se vio que $|\xi_{1/2}|$ es el desplazamiento relativo entre las dos boyas. Así pues, si se trata de captar más potencia, una opción sencilla podría ser maximizar el movimiento relativo entre las dos boyas. Para ello, se procedió a diseñar una nueva boya central sumergida hueca que trabaje a contrafase de la ola similar al sistema AWS o el sistema de PIPO Systems. Esta boya tendrá un determinado volumen de aire en su interior. Esta, al tener volumen variable, se sumerge más o menos, según la ola avance. La idea sería, pues, diseñar un sistema basado en el mismo principio que el enunciado en el punto *Diferencial de presión sumergido*.

Además, se dotó a la boya central o mástil de una forma o perfil hidrodinámico, con la intención de minimizar la resistencia o el coeficiente de arrastre que el movimiento relativo entre el cuerpo y el agua provocaría.

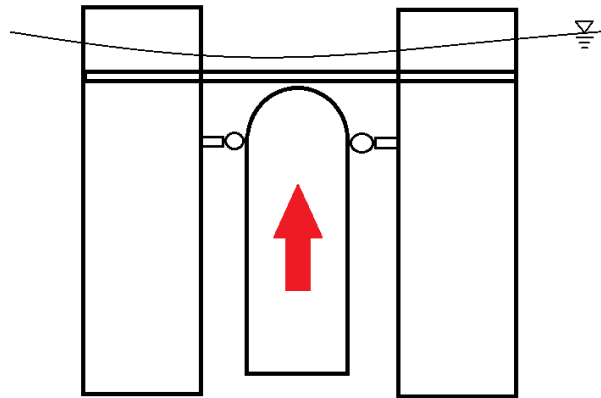


Figura 4-13 Movimiento del mástil cuando se encuentra en el valle de la ola

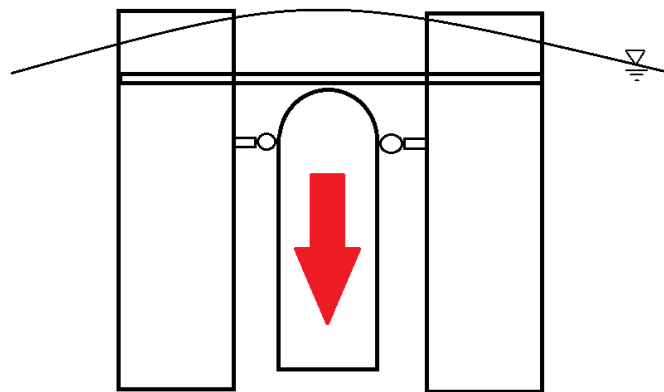


Figura 4-14 Movimiento de la ola cuando se encuentra en la cresta de la ola

La idea es que, al variar la columna de agua sobre la boya sumergida, la presión que el agua ejerce sobre ella también variará haciendo a la boya subir o bajar a contrafase del movimiento de la ola.

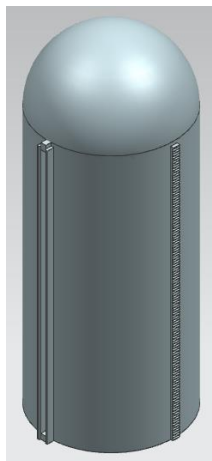


Figura 4-15 Boya central o mástil

Por otro lado, para evitar que el mástil se hunda o flote hasta la superficie, se añadió unos topes en la guía, tanto en la parte superior como en la inferior.

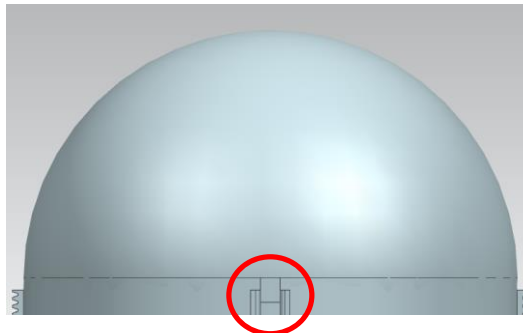


Figura 4-16 Detalle del tope instalado

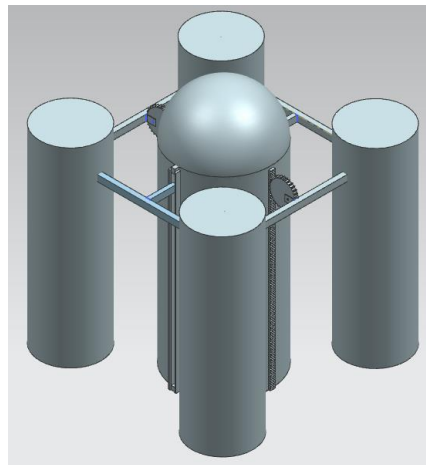


Figura 4-17 Ensamblado de flotadores y mástil hueco

Suponiendo una posición de reposo en la que la boya se encuentra flotando en la superficie del mar,

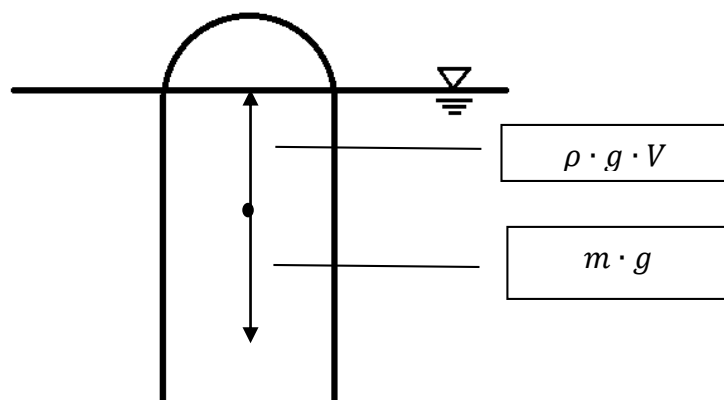


Figura 4-18 Esquema de la boya en estado de reposo

Según el principio de Arquímedes enunciado en el punto 4.2.1: *Simulación de una boya en movimiento*, el empuje realizado por el agua será proporcional al volumen de fluido desalojado y, además, de mismo valor que el peso del cuerpo, de forma que se mantenga en equilibrio.

$$peso = empuje$$

Suponiendo que el material de que el mástil está fabricado es PVC, que tiene una densidad de 1,37 kg/dm³, y un volumen de 1.52 dm³, se obtiene que el mástil tiene una masa de:

$$1,37 \frac{kg}{dm^3} \cdot 1.52 dm^3 = 2.082 kg$$

Y, por lo tanto, pesa:

$$2.082 kg \cdot 9,81 m/s^2 = 20.42 N$$

El empuje que un cuerpo experimenta viene dado por la expresión:

$$empuje = Volumen_{desalojado} \cdot \rho \cdot g$$

Donde ρ es la densidad del fluido en el que se sumerge el cuerpo y g es la aceleración de la gravedad. Tomando 1027 kg/m³ como la densidad del agua de mar y 9,81 m/s² como la aceleración de la gravedad, se obtendrá que:

$$20,42 N = Volumen_{desalojado} \cdot 1,027 \frac{kg}{dm^3} \cdot 9,81 m/s^2$$

Despejando, por lo tanto, el $Volumen_{desalojado}$, se obtiene un valor de:

$$Volumen_{desalojado} = \frac{20,42}{1,027 \cdot 9,81} = 2.03 dm^3$$

Cuando la columna de agua aumenta en el momento en que la cresta se encuentra sobre la boya, la presión vendrá dada por:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Además, se sabe por la ley de Boyle que:

$$P \cdot V = \text{constante}$$

Al aumentar la presión, el volumen del aire encerrado automáticamente ha de disminuir manteniéndose el producto constante. Como consecuencia, si el volumen disminuye, también lo hará el empuje. Si disminuye el empuje (establecido para la condición de equilibrio), el peso del cuerpo será mayor que el empuje vertical, por lo que la boya tenderá a hundirse. El hundimiento de la boya, no obstante, no es continuo, pues llegará un punto en que los topes frenen este movimiento hacia el fondo. Cuando la ola avanza y la boya se encuentra bajo el valle de la ola, la altura de la columna de agua disminuirá y, por ende, la presión. Si la presión disminuye, el volumen del aire debe aumentar y, como resultado, también el empuje. Esto provocará la ascensión de la boya, completándose, de esta manera, el ciclo de la boya al paso de la ola.

Supóngase una ola cuya altura es de 2,5 m. Si la superficie superior de la boya se encontrase en el nivel del agua en estado de reposo, la presión ejercida para esa columna de agua sería:

$$P = \rho \cdot g \cdot h = 1027 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 2,5 m = 25,2 kPa$$

Esta presión es una presión manométrica, por lo que habrá que añadirle la presión atmosférica:

$$P = 25,2 + 101 = 126,2 kPa$$

Según la ley de Boyle,

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

Comparando con el caso de reposo, donde el volumen desplazado era $0,27 dm^3$, y la presión, la atmosférica, se deduce que el volumen desplazado para el caso 2 (bajo los 2,5 m de columna de agua) será:

$$V_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{P_2} = \frac{101 \cdot 2,03}{126,2} = 1,65 dm^3$$

El empuje cambiará según la expresión:

$$\text{empuje} = \rho \cdot g \cdot V_{\text{desalojado}} = 1,027 \cdot 9,81 \cdot 1,65 = 16,62 N$$

Mientras que, por otro lado, el peso del cuerpo es $20,42 N$.

El peso del cuerpo, así pues, es mayor que la fuerza de empuje que experimenta la boya en el momento en el que ésta se encuentra bajo la cresta de la ola y, por lo tanto, se hundirá hasta que la boya se encuentre bajo el valle, momento en que ascenderá hasta igualarse, de nuevo, peso y empuje.

Una vez obtenidos todos los empujes en función de la altura de columna de agua sobre la que se encuentra el cuerpo sumergido, la intención sería, con ayuda de Siemens NX, añadir la expresión de la fuerza a la simulación y estudiar el movimiento relativo entre las dos boyas. La fuerza de empuje para este caso no será una constante, sino que variará entre un valor máximo y un mínimo en función de la altura de la ola bajo la que el cuerpo se encuentra sumergido. De esta forma, la expresión del empuje vendrá dada por:

$$\text{empuje} = \rho \cdot g \cdot V_2 = \rho \cdot g \cdot \frac{P_1 \cdot V_1}{P_2}$$

Sabiendo que $P = \rho \cdot g \cdot h$ y que h varía según una función sinusoidal, se podría afirmar que, para nuestro caso, la expresión de la presión vendría dada por:

$$P = \rho \cdot g \cdot 2,5 \cdot \sin(\omega t)$$

Donde 2,5 m es la amplitud de la ola que se estudia. Finalmente, la expresión que emularía el empuje variable debido al volumen cambiante del cuerpo podría determinarse por:

$$\text{empuje} = \rho \cdot g \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot 2,5 \cdot \sin(\omega t) \cdot V_1}{P_2}$$

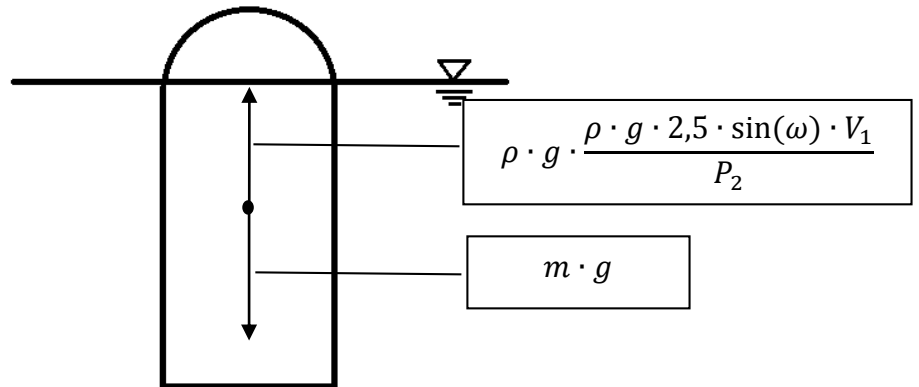


Figura 4-19 Esquema de las fuerzas de peso y empuje que actúan sobre el cuerpo

Además de la fuerza de empuje y el peso, sería necesario simular el movimiento teniendo en cuenta otras fuerzas o factores, como pueden ser las debidas al movimiento del cuerpo dentro del agua, o el de masa añadida. La idea sería simular el movimiento entre las dos boyas de la misma manera que en la Figura 4-4. Además, gracias a la opción de Siemens NX 'sensor', se podría obtener el valor máximo y mínimo de $|\xi_{1/2}|$. No obstante, por falta de tiempo y, sobre todo, de medios (como podría ser llevar a cabo una fase experimental), no pudo llevarse a cabo tal simulación.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El oleaje es un recurso tremendamente infravalorado. A lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se ha demostrado que el recurso energético de la ola es mucho más importante que otros que, actualmente, se encuentran en plena fase de madurez y funcionamiento, como puede ser la energía eólica, la solar o la mareomotriz, instalada en multitud de países.

Europa, y más en concreto, España gozan de gran recurso energético undimotriz. Sin embargo, como se ha podido comprobar a lo largo del presente Trabajo de Fin de Grado, no es el recurso más aprovechado desde el punto de vista energético, pese a que estudios hayan demostrado que la relación precio/energía producida por la energía undimotriz en pocos años se estabilizará, llegando incluso a estar por debajo de otras energías muy recurridas en la actualidad. España ha comprendido el importante recurso que estaría abandonando en caso de no aprovecharlo y ya ha investigado y desarrollado algunos dispositivos de energía undimotriz, siendo un buen ejemplo que lo ilustra el dispositivo instalado en Mutriku.

Los dispositivos de captación de energía undimotriz son elementos complejos a la hora de su diseño por la multitud de factores que entran a jugar parte, tal y como se ha podido comprobar en las páginas anteriores. Además, como toda tecnología incipiente, la energía undimotriz es cara y, de momento, no es una energía competitiva en el mercado como lo son el resto de tecnologías. Por ello, es vital que las naciones sean conscientes del enorme recurso energético que están perdiendo dejando de lado la energía de las olas. El crecimiento de la energía de la ola se ve frenado, pues, por los elevados costes de inversión y generación, por el impacto visual y medioambiental que conlleva la instalación de este tipo de dispositivos, por la falta de programas de apoyo público con el que sí cuentan otros tipos de energía como puede ser la eólica o la solar y por la falta de datos históricos y retornos en el ámbito de la energía undimotriz. Sin embargo, se viene observando en los últimos años que, paulatinamente, los dispositivos estudiados van ganando en inversores, como ya ocurrió con los primeros desarrollos de la energía eólica.

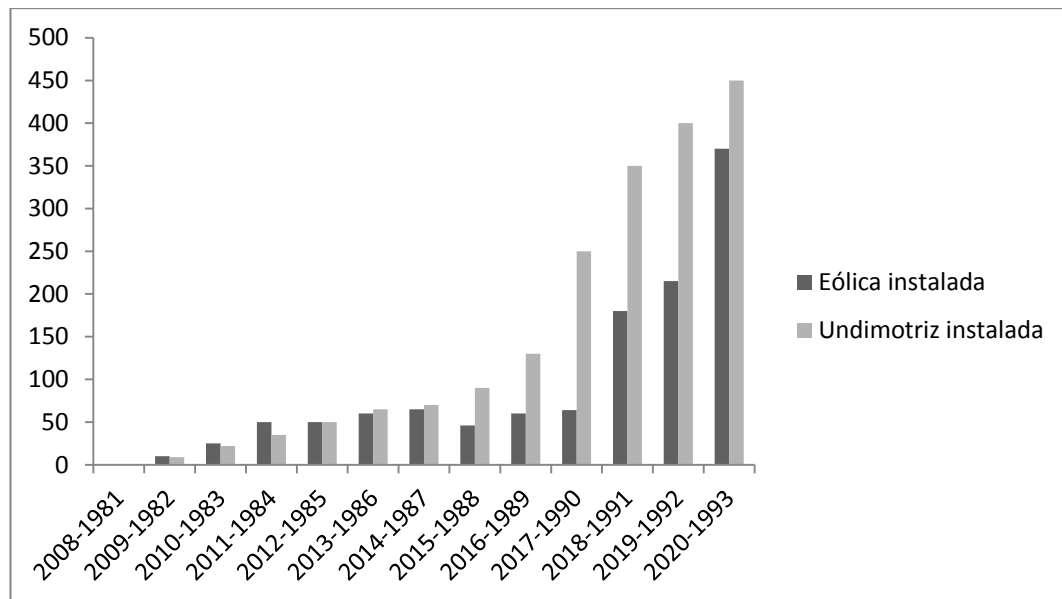


Tabla 5-1 Evolución de dispositivos de energía eólica y undimotriz en Europa según estimación de *The Carbon Trust*

Quizá la clave del progreso de la energía undimotriz sea la extensa variedad de dispositivos WEC que se encuentran instalados o en fase de desarrollo. Es esta gran diversidad lo que hace que, en función de las condiciones meteorológicas reinantes en el lugar, se pueda instalar un dispositivo u otro, dándose así una elevada flexibilidad para su instalación.

En lo referente al diseño preliminar del WEC, es esencial recordar la dificultad de dar con los parámetros correctos para lograr obtener un funcionamiento óptimo del dispositivo. Quizá sea este punto el de mayor dificultad a lo largo del trabajo de investigación y diseño, objeto de este Trabajo de Fin de Grado. No obstante, sí que se logró el objetivo de estudiar los parámetros que formarían parte de un sistema de captación de energía marina y, además, se demostró en el punto *Diseño con estructura exterior y mástil de volumen variable*, que es posible diseñar y comprender el diseño de un sistema de captación de energía undimotriz compuesto de un cuerpo de volumen variable.

5.2 Líneas futuras

El presente Trabajo de Fin de Grado estableció una línea de investigación en el entorno de la energía undimotriz como método de obtención de energía eléctrica y su posible instalación en la costa española. Como continuación a este TFG, se recomiendan los siguientes puntos:

- Para continuar con el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado se podría, con ayuda de los conocimientos adquiridos en el ámbito del diseño de máquinas, obtener un coeficiente c_g relativo al PTO y aplicarlo en la expresión $P(\omega) = \frac{1}{2} \omega^2 c_g |\xi_{1/2}|$. Además, con el software de simulación Siemens NX, se podrían obtener los valores mínimos y máximos de $|\xi_{1/2}|$ para, de esta manera, estimar la potencia que se podría extraer de un sistema de captación de energía undimotriz.

- Siguiendo el proceso normal del desarrollo de un sistema undimotriz, una vez estudiado analíticamente el sistema, se podría profundizar en el estudio proponiendo un método de modelado más detallado para posteriormente construir un prototipo a escala y realizar ensayos en un canal.

- Por otro lado, se propone que, una vez diseñado el sistema de captación de energía, se aplique a una población con ciertas demandas energéticas para estudiar si el sistema es económicamente rentable.
- Estudiar la posible instalación en las cercanías de plataformas petrolíferas para proporcionar autosuficiencia a las mismas, sin necesidad, por lo tanto, de depender de tendido eléctrico submarino, con el coste y mantenimiento que éste supone.
- Estudiar la posible instalación en una población aislada de un continente para convertirse, así, en autosuficiente.
- Estudiar las posibles aplicaciones que de estos tipos de dispositivos se pueden derivar, como podría ser la producción de hidrógeno por electrólisis, desalinización de agua por osmosis inversa, etc.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. C. Sparavigna, Water, air and fire at work in Hero's machines, 2011.
- [2] B. Sørensen, A history of renewable energy technology, Energy policy, 1991.
- «<http://www.bioenergysolar.com>,» [En línea]. Available:
<http://www.bioenergysolar.com/index.php/es/funcionamientosolartermica.html>. [Último acceso: 15
[3] Enero 2016].
- «IDESA: Electricidad y aguas,» 2015. [En línea]. Available:
[4] <http://www.idesasl.es/page.php?p=termosolar>. [Último acceso: 2 Febrero 2016].
- «La tercera,» 2015. [En línea]. Available: <http://static.diario.latercera.com>. [Último acceso: 2016
[5] Enero 15].
- «Aprean,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.aprean.com/energia-termoelectrica.html>. [Último
[6] acceso: 15 Enero 2016].
- [7] A. C. y. J. L. G. Ortega, «Resumen de costes,» Barcelona, 2007.
- «Statoil to build the world's first floating wind farm: Hywind Scotland,» 11 Noviembre 2015. [En
línea]. Available:
http://www.statoil.com/en/NewsAndMedia/News/2015/Pages/03Nov_HywindScotland_news_page.aspx.
[8] [Último acceso: 20 Enero 2015].
- L. R. V. M. Á.-A. B. F. D. P. J. L. S. S. Marta Muñoz Cuesta, «Potencial de energía eólica terrestre y
[9] marina de Europa,» AEMA, Madrid, 2012.
- «Adirse,» [En línea]. Available: [http://www.adirse.org/energias-renovables/energia-eolica/energia-](http://www.adirse.org/energias-renovables/energia-eolica/energia-eolica-terrestre/)
[10] [eolica-terrestre/](http://www.adirse.org/energias-renovables/energia-eolica/energia-eolica-terrestre/). [Último acceso: 20 Enero 2016].
- [11] [En línea]. Available: www.sostenibilidad.com.
- L. M. Lovett, «New America Media,» 15 Mayo 2011. [En línea]. Available:
<http://newamericamedia.org/2011/05/lives-interrupted---china-and-the-three-gorges-dam.php>. [Último
[12] acceso: 18 Enero 2016].
- «AENews,» 2016. [En línea]. Available: [http://www.alternative-energy-](http://www.alternative-energy-news.info/technology/hydro/tidal-power/)
[13] [news.info/technology/hydro/tidal-power/](http://www.alternative-energy-news.info/technology/hydro/tidal-power/). [Último acceso: 20 Enero 2016].
- F. Darthou, Interviewee, *Usine marémotrice EDF de la Rance (Bretagne, France)*. [Entrevista]. 18
[14] Septiembre 2011.
- «Photator,» 2016. [En línea]. Available: [http://photator.com/photo/33017/one-of-the-turbines-of-](http://photator.com/photo/33017/one-of-the-turbines-of-the-rance-tidal-power-station-france-)
[15] [the-rance-tidal-power-station-france-](http://photator.com/photo/33017/one-of-the-turbines-of-the-rance-tidal-power-station-france-). [Último acceso: 2016 Enero 25].
- M. Schneeberger, «Sihwa Tidal-Turbines and Generators for the World's Largest Tidal Power
[16] Plant,» British Hydropower Association, Linz, Austria, 2008.
- R. C. P. A. C. S. M.-A. C. G. José Antonio Carta González, Centrales de energías renovables,
[17] Madrid: Pearson Prentice Hall, 2009.

- A. Vercelli, «Energías como bienes comunes,» 3 Octubre 2012. [En línea]. Available: <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/03/que-es-la-energia-mareomotriz/>. [Último acceso: 21 Enero 2016].
- R. P. M. B. A. L. Logan M. Ashall, «Variability in suspended sediment concentration in the Minas [19] Basin, Bay,» Elsevier, Canada, 2015.
- «Tidal Energy Today,» 21 Julio 2015. [En línea]. Available: <http://tidalenergytoday.com/2015/07/21/uk-companies-welcome-uk-canada-tidal-research-grants/>. [20] [Último acceso: 2 Febrero 2016].
- L. Chapman, «Radio Internacional Canada,» 9º Noviembre 2015. [En línea]. Available: <http://www.rcinet.ca/es/2015/11/09/la-energia-de-las-mareas-un-sueno-que-cobra-vida-en-la-bahia-de-fundy/>. [21] fundy/. [Último acceso: 9 Enero 2016].
- «Marine Current Turbines - An Atlantis Company,» [En línea]. Available: <http://www.marineturbines.com/SeaGen-Products/SeaGen-S>. [22] [Último acceso: 19 Enero 2016].
- «Marine Current Turbines,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.marineturbines.com/SeaGen-Products>. [23] [Último acceso: 2 Febrero 2016].
- «Emec - European Marine Energy Centre,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>. [24] [Último acceso: 26 Enero 2016].
- NOAA, «NOAA National Oceanic And Atmospheric Administration,» 13 Junio 2014. [En línea]. [25] Available: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/current.html>. [Último acceso: 19 Enero 2016].
- «Miniesto - Power from Tides,» [En línea]. Available: <http://minesto.com/deep-green/>. [Último [26] acceso: 20 Enero 2016].
- «Power Generation Using the Kuroshio Current,» IHI Engineering Review, 2014. [27]
- J. G. Espinosa, «Proyecto OWC: Diseño y optimización de una planta de energía undimotriz,» UPC, [28] Barcelona, 2011.
- «Twenergy,» 29 Julio 2013. [En línea]. Available: <http://twenergy.com/a/la-energia-undimotriz-879>. [29] [Último acceso: 18 Enero 2016].
- J. F. Chozas, *Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de [30] electricidad*, Madrid: Proyecto de Fin de Carrera, 2008.
- M. A. Ormazá, «La energía renovable procedente de las olas,» *e-Revista Didáctica* 8, vol. 25, nº 8, p. [31] Febrero, 2012.
- «Wave dragon,» 2005. [En línea]. Available: http://www.wavedragon.net/index.php?option=com_content&task=view&id=6. [Último acceso: 20 [32] Enero 2016].
- E. F. H.C. Soerensen, «Development of Wave Dragon from Scale 1:50 to Prototype». [33]
- J. I. Andreotti, «¿Cómo funciona el Pelamis?,» 24 Agosto 2014. [En línea]. Available: <http://ingenieroandreotti.blogspot.com.es/2014/08/como-funciona-el-pelamis.html>. [Último acceso: 20 [34] Enero 2016].
- S. d. M. Sánchez, «Tecno y Ciencia,» 9 Febrero 2012. [En línea]. Available: <http://tecnociencia.com/2012/las-olas-tienen-poder>. [Último acceso: 20 Enero 2016]. [35]

- [36] IDAE, «Plan de Energías Renovables,» Madrid, 2011.
- «Wave Energy Basque Country,» 2015. [En línea]. Available:
<http://www.waveenergybasquecountry.com/es/proyectos-i-d-e-infraestructuras-singulares/mutriku>.
[37] [Último acceso: 17 Enero 2016].
- [38] R. Arlitt, «The Perspective of Voith Siemens Hydropower Generation,» Heidenheim.
- «EVE: Ente Vasco de la Energía,» Gobierno Vasco, 2015. [En línea]. Available:
<http://www.eve.eus/Proyectos-energeticos/Proyectos/Energia-Marina.aspx>. [Último acceso: 2 Febrero
[39] 2016].
- «Thermal-Fluids Central,» 21 Julio 2010. [En línea]. Available:
https://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Power_Generation_from_Waves. [Último
[40] acceso: 3 Febrero 2016].
- «Gulyjosy's Blog,» 7 Junio 2010. [En línea]. Available: <https://gulyjosy.wordpress.com/>. [Último
[41] acceso: 2 Febrero 2016].
- «PIPO Systems,» PIPO Systems, [En línea]. Available:
[42] <http://www.piposystems.com/sistemaapspisys.html>. [Último acceso: 1 Marzo 2014].
- «Power-Technology,» 2016. [En línea]. Available: [http://www.power-](http://www.power-technology.com/projects/statkraft-osmotic/statkraft-osmotic2.html)
[43] [technology.com/projects/statkraft-osmotic/statkraft-osmotic2.html](http://www.power-technology.com/projects/statkraft-osmotic/statkraft-osmotic2.html). [Último acceso: 2 Febrero 2016].
- [44] de *Energía Maremotérmica*, pp. 569-588.
- «BIMEP,» IDAE, EVE, Gobierno Vasco, 2013. [En línea]. Available: <http://bimep.com/>. [Último
[45] acceso: 10 Febrero 2016].
- European Regional Development Fund y Gobierno del Reino Unido, 2015. [En línea]. Available:
[46] <http://www.wavehub.co.uk/>. [Último acceso: 11 Febrero 2016].
- S. J.Beatty, Analysis oand Development of a Three Body Heaving Wave Energy Converter,
[47] Columbia, 2003.
- [48] I. d. H. A. I. Cantabria, «Evaluación del Potencial de la Energía de las Olas,» IDAE, Madrid, 2011.
- [49] Í. J. L. Rodríguez, «Evaluación del Potencial de la Energía de las Olas,» IDAE, Santander, 2010.
- [50] BOE, «Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo,» 2007.
- [51] BOE, «Real Decreto 1028/2007, de 20 de julio,» 2007.
- «Red Costera de Boyas. Informe de datos de la boya "Gijón Exterior",» Puertos del Estado, Madrid,
[52] 2003.
- «Ocean Power Technology,» OPT, 2015. [En línea]. Available:
[53] <http://www.oceanpowertechnologies.com/apb-350>. [Último acceso: 24 Febrero 2016].
- Y.-H. Y. Ye Li, «A synthesis of Numerical Methods for Modeling Wave Energy Converter-Point
[54] Absorbers,» NREL, 2012.
- S. J. Beatty, "Analysis and Development of a Three Body Heaving Wave Energy Converter,"
[55] University of British Columbia, Victoria, 2009.
- [56] Y.-L. Wang, «Design of a cylindrical buoy for a wave energy converter,» Elsevier, Taiwan, 2014.

U. A. C. o. Engineers, in *Shore Protection Manual Volume I*, Vicksburg, Mississippi, Department of [57] the Navy, 1984, pp. 2-17.

AENOR, «Energía marina. Convertidores de energía de olas, mareas y otras corrientes marinas,» [58] Madrid, 2013.

[59] J. Casas-Vázquez, Física para la ciencia y la tecnología, Barcelona: Reverté, 2005.

ANEXO I: TEORÍA LINEAL DEL OLEAJE

Para el desarrollo de este TFG, es necesario disponer de ciertos conocimientos relativos al movimiento de las masas de agua, y más en concreto, a cómo se propagan las olas, centro y principio del trabajo.

Una buena aproximación que ayudaría a comprender el desplazamiento de las olas y a obtener un espectro energético del oleaje es la teoría de Airy (o teoría lineal de la ola), publicada por George Biddel Airy en el siglo XIX. Esta teoría, que es la aproximación más simple de primer orden, se usa comúnmente en ingeniería oceánica y es capaz de dar una solución a la cinemática y dinámica de la ola, de forma que también se pueden estimar los efectos que éstas producen.

La propagación del oleaje en un fluido es un proceso no lineal. Sin embargo, se puede simplificar su análisis físico y matemáticos con algunas consideraciones:

- Las fuerzas principales a considerar son la gravedad y las producidas por las fuerzas de presión, suponiendo un fluido newtoniano no viscoso ($\mu=0$) en el que las tensiones tangenciales se consideran despreciables.
- El agua es un fluido incompresible ($\rho = \text{cte}$).
- El movimiento se reducirá a una componente horizontal u_x y una vertical u_z .
- Se tratará de un movimiento irrotacional, por lo que se podrá definir un potencial de velocidades.
- El fondo será fijo, impermeable y a una profundidad constante
- Se supondrá una ola periódica y regular y que la única fuerza exterior que tiene efecto sobre el fluido es la gravedad terrestre.
- No se tendrá en cuenta la tensión superficial, ni el efecto Coriolis, ni las pérdidas por rotura de la ola.
- La amplitud de la ola es pequeña si la comparamos con la longitud de onda y la profundidad.

Nomenclatura

Φ : potencial de velocidades

η : desplazamiento del agua en la superficie libre

t : tiempo

p_{atm} : presión atmosférica

ρ : densidad

w : componente vertical de la velocidad

z : altura de la ola con respecto al nivel medio

Como se dijo anteriormente, una de las simplificaciones que se llevaban a cabo en el enunciado de esta teoría es que se trata el agua como un fluido irrotacional e incompresible, donde se puede definir un potencial de velocidades $\phi(X, t)$, por lo que cumple la ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$$

Además, son necesarias condiciones límite, tanto en el fondo, como en la superficie libre, con la finalidad de cerrar el sistema de ecuaciones. De esta forma, se enuncia la primera condición de contorno en la superficie libre $\eta(x, t)$, por la que se considera que las partículas de agua en la superficie libre permanecen en esta:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

Donde $\eta(x, t)$ es el desplazamiento medio del agua en la superficie libre con referencia al nivel medio del agua y w es la componente vertical de la velocidad.

Por otro lado, la segunda condición de contorno en la superficie libre (ecuación de Bernoulli), afirma que:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p_{atm}}{\rho} + \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 + g\eta = 0$$

Por la condición de contorno por fondo, la componente vertical de la velocidad ha de ser nula en las partículas del fondo $w = -\dot{h}(x)$, delimitándose así:

$$w = -u \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

Hay que añadir, además, la condición de contorno lateral. Debido a la superposición de oleaje (Figura 0-1 Superposición de oleaje oceánico. regular y periódico, esta condición de contorno debe expresar la periodicidad en una longitud de onda L y período T .

$$\phi(x, t) = \phi(x + L, t)$$

$$\phi(x, t) = \phi(x, t + T)$$

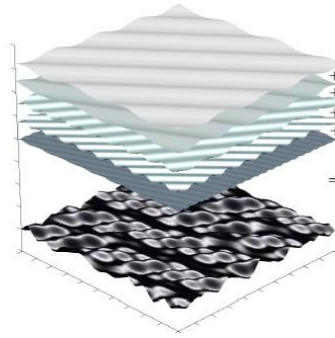


Figura 0-1 Superposición de oleaje oceánico. [38]

Todas las ecuaciones expuestas hasta ahora forman un sistema no lineal de ecuaciones diferenciales. A continuación se expondrá la teoría lineal de Airy que simplifica la estructura física y matemática del fenómeno para obtener aproximaciones a la solución. Así pues, Airy supone el potencial de la velocidad como el producto de los siguientes términos independientes:

$$\phi(x, z, t) = X(x) \cdot Z(z) \cdot R(t)$$

Y simplifica la primera ecuación de contorno considerando que la amplitud comparada con la longitud de onda es pequeña, obteniendo:

$$w|_{z=0} \cong \frac{\partial \eta}{\partial t}$$

También simplifica y linealiza la segunda ecuación de contorno en la superficie libre. Tomando el valor de la presión en la superficie = 0, y considerando u y w pequeñas (anulándose pues su producto) la ecuación de Bernoulli queda reducida a:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \text{ en } z = 0$$

El fondo, además, se considera horizontal, con lo que la condición de contorno de fondo se reescribe ahora como:

$$w = -u = 0 \text{ en } z = -h$$

Solución del sistema de ecuaciones

El potencial de velocidad $\phi(x, z, t)$ debe ser periódico en x , y debe ser solución de la ecuación de Laplace. Una posibilidad que cumple este criterio es escribir $R(t)$ del siguiente modo:

$$R(t) = \sin(\sigma t), \text{ con } \sigma = \frac{2 \cdot \pi}{T} \text{ como frecuencia angular}$$

De este modo, se puede expresar la ecuación $\phi(x, z, t)$ como $\phi(x, z, t) = X(x) \cdot Z(z) \cdot \sin(\sigma \cdot t)$, con lo que la ecuación de Laplace se reescribiría como:

$$\frac{1}{X} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{Z} \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = 0$$

La única posible solución para esta ecuación en derivadas parciales mediante el método de separación de variables que cumple con la condición de periodicidad es:

$$\phi(x, z, t) = (A \cos(kx) + B \sin(kx)) \cdot (C \cdot e^{kz} + D \cdot e^{-kz}) \cdot \sin(\sigma \cdot t)$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

Para determinar las constantes sólo se ha de imponer las condiciones de contorno por fondo. Con todo esto se obtiene el valor del potencial de la velocidad:

$$\phi = \frac{H}{2} \cdot \frac{g}{\sigma} \cdot \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(h+z)} \cdot \sin(kx - \sigma \cdot t)$$

Mediante la segunda condición de contorno en superficie libre, se obtiene el desplazamiento del nivel del agua:

$$\eta = \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = \frac{H}{2} \cdot \cos(kx - \sigma \cdot t)$$

Mediante la primera condición de contorno en superficie libre se puede obtener para cualquier potencial de velocidad ϕ y su superficie libre h una expresión que relaciona la frecuencia angular con el número de onda. Esta permite encontrar la longitud de onda en función del período y el calado.

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

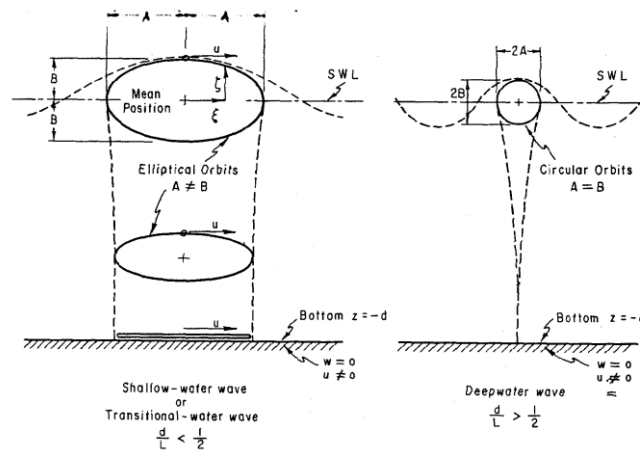


Figura 0-2 Desplazamiento de las partículas de agua en aguas poco profundas y en aguas profundas. [48]

Es muy interesante notar que, a pesar de todas las aproximaciones que se han tenido en cuenta, la teoría lineal de ondas puede predecir varias características de las olas, siempre que éstas tengan una pequeña amplitud comparada con su longitud de onda. Una de estas características es el movimiento que siguen las partículas del líquido para distintas profundidades.

Estas relaciones, que en realidad son aproximaciones matemáticas, surgen directamente de resolver la ecuación de onda y se pueden resumir de la siguiente manera, tal y como se refleja en la Figura 0-2 Desplazamiento de las partículas de agua en aguas poco profundas y en aguas profundas.

- Para aguas profundas las partículas del fluido siguen trayectorias circulares, cuyo diámetro decrece exponencialmente con la profundidad;
- Para aguas intermedias, las trayectorias de las partículas son elípticas y los ejes mayor y menor disminuyen exponencialmente con la profundidad, siendo el eje mayor paralelo a la superficie del agua;
- Por último, para aguas someras, las trayectorias son como las de aguas intermedias, pero el eje mayor es independiente de la profundidad

Con estas condiciones, se obtienen los siguientes resultados:

Profundidad relativa	Aguas poco profundas $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$	Aguas intermedias $\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	Aguas profundas $\frac{d}{L} < \frac{1}{2}$
Perfil de agua	Idem >	$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right)$ $= \frac{H}{2} \cos\theta$	<Idem
Celeridad del agua	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
Longitud de onda	$L = T\sqrt{gd} = CT$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0T$
Velocidad de conjunto	$C_g = C = \sqrt{gd}$	$C_g = nC = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(\frac{4\pi d}{L})} \right] C$	$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$
Velocidad de la partícula de agua	Hor. $u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos\theta$ Vert. $w = \frac{H\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \sin\theta$	Hor. $u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[\frac{2\pi(z+d)}{L}]}{\cosh(\frac{2\pi d}{L})} \cos\theta$ Vert. $w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh[\frac{2\pi(z+d)}{L}]}{\cosh(\frac{2\pi d}{L})} \sin\theta$	Hor. $u = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos\theta$ Ver. $w = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin\theta$
Aceleración de las partículas de agua	$a_x = \frac{Hn}{T} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin\theta$ $a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos\theta$	$a_x = \frac{g\pi h}{L} \frac{\cosh[\frac{2\pi(z+d)}{L}]}{\cosh(\frac{2\pi d}{L})} \cos\theta$ $a_z = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(\frac{2\pi d}{L})}$	$a_x = 2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin\theta$ $a_z = 2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos\theta$
Desplazamiento de las partículas de agua	$\xi = -\frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin\theta$ $\zeta = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos\theta$	$\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh[\frac{2\pi(z+d)}{L}]}{\sinh(\frac{2\pi d}{L})} \sin\theta$ $\zeta = \frac{H}{2} \frac{\sinh[\frac{2\pi(z+d)}{L}]}{\sinh(\frac{2\pi d}{L})} \cos\theta$	$\xi = -\frac{H}{2} e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin\theta$ $\zeta = \frac{H}{2} e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos\theta$
Presión submarina	$p = \rho g(\eta - z)$	$p = \rho g\eta \frac{\cosh[\frac{2\pi(z+d)}{L}]}{\cosh(\frac{2\pi d}{L})} - \rho g z$	$p = \rho g\eta e^{\frac{2\pi z}{L}} - \rho g z$

Tabla 0-1 Soluciones de la Teoría de Airy

