



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## TESINA D'ESPECIALITAT

**Títol**

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LA ENERGÍA DEL  
OLEAJE EN LA COSTA DE MARRUECOS**

**Autor/a**

**CÉSAR MARTÍN AMER**

**Tutor/a**

**JOAN PAU SIERRA PEDRICO**

**Departament**

**EHMA – INGENIERÍA HIDRÁULICA, MARÍTIMA Y AMBIENTAL**

**Intensificació**

**INGENIERÍA MARÍTIMA**

**Data**

**JUNIO 2015**

# RESUMEN

## Evaluación del potencial de la energía del oleaje en la costa de Marruecos

**Autor:** César Martín Amer

**Tutor:** Joan Pau Sierra Pedrico

**Palabras clave:** Energía del oleaje, potencia del oleaje, wave energy converter, Pelamis, Wave Dragon, costa de Marruecos

En las últimas décadas las principales fuentes energéticas han sido las procedentes de combustibles fósiles. Esta desmesurada explotación ha favorecido la aparición del cambio climático y sus futuras dramáticas consecuencias. Una regeneración en el modelo energético actual es vital para garantizar la sostenibilidad en las próximas décadas, y este cambio debe estar dirigido a las energías renovables, un tipo de energía que no contamine y no se agote nunca.

Entre las numerosas alternativas de fuentes renovables existentes hay que destacar la emergente energía marítima. Los mares y océanos del planeta contienen una inmensa cantidad de energía, como la de las corrientes, las mareas, las olas, la diferencia de salinidad o temperatura, que debería de aprovecharse.

De entre todas estas fuentes energéticas, este estudio trabaja con la energía del oleaje. Actualmente se están desarrollando dispositivos capaces de explotar esta energía de forma eficiente. Sin embargo, aún no se encuentra en completa fase de comercialización, a causa de la falta de fondos, la poca cooperación institucional o la falta de desarrollo por parte de los prototipos.

En este trabajo se ha realizado un análisis de la energía del oleaje en la costa marroquí. La investigación en este campo pretende ayudar a un futuro aprovechamiento de este tipo de fuente renovable en esa zona. Los planes energéticos de los estados, como es el caso de Marruecos, cuentan con el auge de las energías limpias, de modo que en los próximos años se podría llevar a cabo la explotación de la energía de las olas en algún punto del litoral marroquí.

Para determinar el potencial del oleaje se han utilizado datos procedentes del modelado numérico (SIMAR-44). A través de éstos se han determinado los puntos en los que resultaría más factible la instalación de dispositivos convertidores de la energía del oleaje (WEC). Para el análisis del aporte energético que se obtendría mediante dicha instalación se ha trabajado con dos WEC: el Pelamis y el Wave Dragon.

En los resultados se determina qué localizaciones son las más apropiadas para establecer un dispositivo WEC, en concreto qué punto de los utilizados en el estudio resultar ser el más factible, a través de la generación energética resultante de la instalación de los dos aparatos y valorado mediante los factores de capacidad de los mismos.

## ABSTRACT

### Assessing the potential of wave energy on the coast of Morocco

**Author:** César Martín Amer

**Tutor:** Joan Pau Sierra Pedrico

**Keywords:** Wave energy, wave power, wave energy converter, Pelamis, Wave Dragon, Morocco coast

In recent decades the main energy sources have been those from fossil fuels. This excessive exploitation has encouraged the emergence of climate change and its future dramatic implications. Regeneration in the current energy model is vital to ensure sustainability in the coming decades, and this change must be directed to renewable energy, a type of energy that does not pollute and is never exhausted.

Among the numerous alternatives of existing renewable sources the emerging marine energy must be highlighted. The seas and oceans contain a huge amount of energy that can be extracted from currents, tides, waves, salinity or temperature difference, which should be harnessed.

From all these energy sources, this study works with wave energy. Currently there are devices capable of exploiting this energy efficiently. However, they are not yet in full marketing phase, due to lack of funds, lack of institutional cooperation or lack of development of prototypes.

This paper has conducted an analysis of wave energy on the Moroccan coast. Research in this field aims to help future exploitation of such renewable resource in that area. The energy plans of the states, such as Morocco, expect the boom of clean energy, so that in the coming years could bring out the exploitation of wave energy somewhere in the Moroccan coast.

To determine the potential of the waves data from the numerical modeling (SIMAR-44) have been used. From this data the more suitable points for installation of wave energy converter (WEC) devices have been determined. For the analysis of energy output that would be obtained by such installation two WECs, Pelamis and Wave Dragon have been used.

The results allowed to determine which locations are the most appropriate to deploy a WEC device, specifically which of those used in the study prove that is the most feasible, through the power generation resulting from the installation of both machines and assessed by their capacity factors.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción del problema .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Estructura de la tesina.....	2
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>3</b>
2.1. Introducción general sobre la energía de las olas.....	3
2.1.1. Energías del mar .....	3
2.1.1.1. Energía mareomotriz.....	4
2.1.1.2. Energía de las corrientes .....	5
2.1.1.3. Energía térmica oceánica .....	6
2.1.1.4. Energía osmótica .....	6
2.1.1.5. Energía de las olas .....	7
2.1.2. Potencia del oleaje .....	11
2.1.3. Convertidores de energía del oleaje .....	13
2.1.3.1. Pelamis .....	16
2.1.3.2. Wave Dragon .....	19
2.2. Estudios en zonas cercanas (Atlántico) .....	22
2.3. Energías renovables en Marruecos .....	27
2.3.1. Energía solar .....	29
2.3.2. Energía eólica .....	30
2.3.3. Otras fuentes de energía .....	31
<b>3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>32</b>
3.1. Características de la costa atlántica marroquí .....	32
3.2. Características del oleaje atlántico .....	33
3.3. Zona de estudio .....	36

<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>38</b>
4.1. Datos utilizados .....	38
4.2. Análisis de la energía del oleaje .....	42
4.2.1. Potencia media anual .....	42
4.2.2. Distribución temporal.....	43
4.2.3. Distribución direccional.....	45
4.2.4. Coeficientes de variabilidad .....	47
4.3. Aplicación a la producción de energía .....	48
4.3.1. Producción energética.....	48
4.3.2. Factores de capacidad.....	50
4.3.3. Tiempo de inactividad ( <i>Idle time</i> ).....	51
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
5.1. Potenciales extraídos .....	53
5.2. Producción energética.....	63
<b>6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>70</b>
6.1. Conclusiones.....	70
6.2. Trabajo futuro .....	72
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEJOS .....</b>	<b>76</b>
Anejo 1. Tablas de encuentros y aportes energéticos de los puntos seleccionados .....	77

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Descripción del problema**

Hoy en día las necesidades energéticas del planeta siguen en continuo crecimiento. El aumento generalmente constante de la población y el auge de determinadas actividades crean un panorama en el que cada vez hay que buscar nuevas formas de generar energía. Esto se focaliza sobre todo en los países emergentes, como es el caso de Marruecos, donde la demanda energética año tras año es mayor y los factores mencionados agravan de forma más notoria la situación.

Otro agente que influye en esta realidad es el hecho de que las fuentes más explotadas son las procedentes de los combustibles fósiles, es decir, fuentes no renovables y contaminantes. El problema de este uso masivo es la escasez que se provoca sobre estas materias. Además, las ingentes cantidades de CO<sub>2</sub> que se arrojan a la atmósfera por culpa de su utilización alrededor del mundo propician un aceleramiento del cambio climático, evidenciable en numerosos estudios que se han realizado. El aumento de la temperatura media del globo podría tener funestas consecuencias, ya que se han previsto unos crecimientos del nivel medio del mar alarmantes para finales del siglo XXI. Este hecho podría provocar la inundación de multitud de zonas costeras, lo que afectaría a millones de personas. Además, se han de tener en cuenta otros efectos, como por ejemplo la posible aparición de enfermedades tropicales en climas actualmente no tropicales.

Ante esta situación, las energías renovables han de propiciar el cambio energético que se espera. A Marruecos, como país emergente que es, le interesa enormemente el desarrollo de este tipo de fuentes de energía, tanto por razones medioambientales, como por motivos económicos. Las primeras ya se han comentado en el párrafo anterior. En cuanto a las cuestiones económicas, el principal factor a tener en cuenta es la dependencia energética del exterior que sufre el estado. Al ser un país no productor de combustibles fósiles, conseguir la energía para abastecer todo el territorio genera grandes gastos de capital. Un modelo energético renovable permitiría a Marruecos, entre otras cosas, ser más autosuficiente, economizar los gastos y contaminar menos.

En este punto es donde cobra importancia el presente estudio. Marruecos cuenta con un plan energético en el que apuesta fuertemente por las energías renovables, como se comentará en el siguiente capítulo. En un futuro, al poner en marcha el plan se considerarán las mejores opciones para llevarlo a cabo satisfactoriamente. Entre estas opciones podría aparecer la de aprovechar la energía de las olas de la costa marroquí, de la misma forma que otros tipos de energía que genera el mar. Con el paso del tiempo se irán optimizando los convertidores de energía del oleaje (WEC) y la energía generada por las olas irá ganando peso. Para conseguir un futuro sostenible y limpio se ha de apostar por este tipo de fuentes renovables.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente estudio es analizar la posibilidad de aprovechar una energía marítima renovable en la costa marroquí, la energía del oleaje. Junto a este fin se estudiarán una serie de objetivos más específicos, que son los siguientes:

- Conocer el estado del arte de este tipo de energía y otras energías renovables en Marruecos.
- Analizar el recurso de las olas (energía potencialmente disponible) en su litoral.
- Analizar la distribución tanto espacial como temporal y direccional de la energía del oleaje para conocer la zona de mayor productividad.
- Estudiar la factibilidad de desplegar dos tipos de WEC (Pelamis y Wave Dragon) en estos puntos de la costa marroquí.

## 1.3 Estructura de la tesina

La tesina se ha dividido en seis capítulos que, a parte de éste, son los siguientes:

- El capítulo 2 describe el estado del arte en tres apartados. En el primero de ellos se hace una introducción general de la energía de las olas. En el segundo se comentan los resultados obtenidos en estudios que se han hecho en zonas cercanas a la del análisis. En el tercero se explican brevemente otras fuentes de energía renovable que ya se aprovechan o que se aprovecharán en el futuro en Marruecos.
- El capítulo 3 realiza una descripción de la zona de estudio que también se divide en tres apartados. En el primero se detalla la geografía costera del estado marroquí. En el segundo se exponen las características del oleaje. En el tercero se muestra la zona de estudio y los puntos concretos estudiados.
- El capítulo 4 está dividido en tres secciones en las que se analiza la energía del oleaje en la costa marroquí. En la primera se introducen los datos utilizados. En la segunda se muestra la metodología para obtener los parámetros de interés de la energía del oleaje (potencia media), así como sus distribuciones espaciales, temporales y direccionales, y varios indicadores. La tercera sección hace referencia a los cálculos necesarios para conocer la producción energética mediante la instalación de los dos dispositivos WEC con los que se ha trabajado y sus respectivos coeficientes.
- El capítulo 5 se muestran y se discuten los resultados de los parámetros expuestos en el capítulo 4.
- El capítulo 6 muestra, en un primer apartado, la discusión de las conclusiones alcanzadas tras analizar los resultados obtenidos y, en un segundo apartado, las ideas expuestas para la continuación del trabajo en el futuro.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Introducción general sobre la energía de las olas

#### 2.1.1. Energías del mar

Los océanos, que cubren el 70% de la superficie de la Tierra, ofrecen un potencial energético enorme que actualmente está desaprovechado. En los últimos años han ido apareciendo diversas tecnologías capaces de sacarle partido a las energías marítimas. El cambio climático, que ha propiciado la búsqueda de alternativas energéticas renovables y limpias que sean capaces en un futuro de sustituir las actuales energías convencionales (basadas en combustibles fósiles y nucleares), junto al desarrollo de nuevas tecnologías han favorecido el auge de las energías oceánicas. Sin embargo, en el ámbito de las energías, las convencionales siguen teniendo mucho más peso que las renovables [figura 2.1].

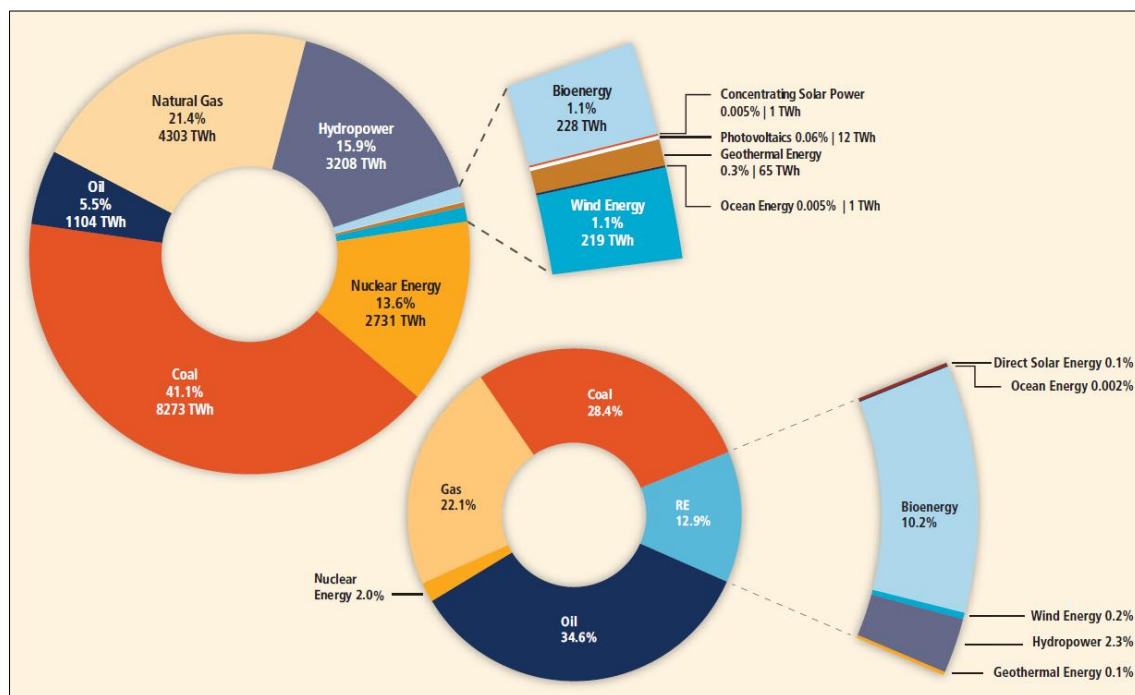


Figura 2.1. Aporte de las fuentes de energía en el suministro mundial de energía primaria en el 2008 (izquierda). Aporte de las fuentes de energía primaria en la generación de electricidad mundial en el 2008 (derecha) (Fuente: IEA)

El constante movimiento de las grandísimas masas de agua que forman los océanos y mares hacen de ellos unas fuentes inagotables de energía. La extracción y aprovechamiento de ésta en cualquiera de sus formas puede ser un aspecto clave para la Unión Europea con el fin de alcanzar el objetivo propuesto para el año 2020, en el que se pretende que el 20% del aporte energético provenga de energías renovables.



En el caso de Marruecos, como se verá más adelante [capítulo 2.3], las energías marítimas también podrían formar parte de su plan energético futuro, similar al de la UE.

Existen varias formas de aprovechar la energía del mar, tanto a partir de su movimiento como de sus propiedades. Algunas ya están siendo explotadas en la actualidad, mientras que otras están en fase de pruebas y lo estarán en un futuro próximo. Entre estas variantes energéticas se encuentran la energía mareomotriz, la de las corrientes marinas, la térmica oceánica, la osmótica, la de las olas u otras más desconocidas como la oceanogénica, que utiliza la rotación de la Tierra para aprovechar la fuerza centrífuga. A continuación se detallarán algunas de ellas.

### 2.1.1.1. Energía mareomotriz

Esta energía, como su nombre indica, aprovecha la energía que producen el ascenso y descenso de las mareas a causa de la acción gravitatoria del Sol y la Luna sobre la Tierra.

La gran ventaja que tiene es que es perfectamente predecible, ya que los ciclos de marea son conocidos con exactitud. Sin embargo, el coste económico y ambiental de instalar los dispositivos necesarios en la actualidad es demasiado elevado en relación a la energía que se obtiene y ha resultado un impedimento para el desarrollo total de su explotación. Únicamente se ha llevado a cabo su implantación en ciertos lugares del Atlántico. Además, las zonas de mayor potencial son las bahías con mareas superiores a 5 ó 6 m. Esta situación únicamente se da en unas 40 zonas en todo el mundo [figura 2.6]. En un futuro la mejora de la eficiencia tecnológica, sobre todo a nivel económico, permitirá la implantación de más centrales. Su potencial se ha estimado en 3,7 TW anuales, de los cuales 15 GW serían aprovechables.

La extracción de esta energía se basa en construir un dique para así crear un depósito que se llena con la pleamar y se vacía con la bajamar. Toda el agua retenida pasa por una turbina que aprovecha el desnivel. Existen dos métodos de generación de energía:

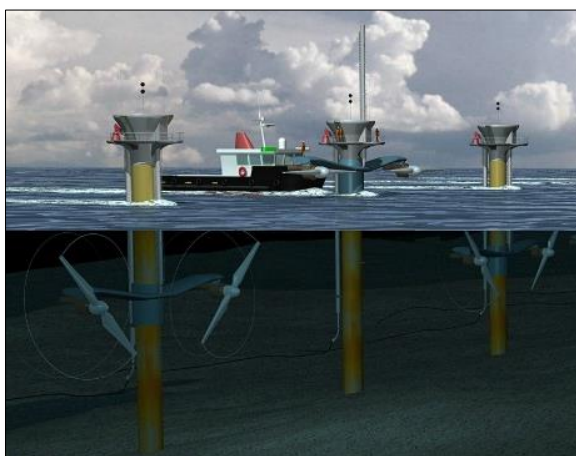


Figura 2.2. Generador mareomotriz de corrientes de marea (Fuente: [www.proyectopv.org](http://www.proyectopv.org))

Generador de corriente de marea: aprovecha la energía cinética del agua en movimiento a causa de las mareas. Su coste e impacto son bajos en comparación con otros métodos, lo que le da buena popularidad [figura 2.2].

Embalse de marea: la diferencia de altura entre pleamares y bajamares provoca que exista una energía potencial de la cual hace uso este método. Es un sistema similar al empleado en las centrales hidroeléctricas. Tiene un gran impacto medioambiental al tener que instalarse en estuarios.

La instalación mareomotriz más importante del mundo es la central de la Rance, en Francia, inaugurada en 1966. Produce al año 4.400 GWh de media y tiene una potencia instalada de 240 MW. El coste del kWh resultó ser similar o inferior al de una central eléctrica convencional. Sin embargo, produjo un fuerte impacto ambiental. En Corea del Sur se encuentra la planta con mayor potencia instalada, de 256 MW.

### **2.1.1.2. Energía de las corrientes**

La energía de las corrientes marinas se basa en el aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes para transformarla en energía eléctrica. Al igual que la energía mareomotriz, una gran ventaja de la que dispone es que cuenta con unos ciclos altamente predecibles. Existen diversos tipos de corrientes, que son causadas entre otros motivos por la fuerza gravitatoria del sol y la luna (corrientes de marea, las más habituales en su explotación), por la diferencia de temperatura y salinidad, y por el efecto Coriolis debido a la rotación terrestre. Además, su impacto ambiental es relativamente bajo.

Se ha estimado que la potencia de esta fuente renovable alrededor del mundo es de 5 a 8 TW al año, de los cuales 30 GW serían aprovechables. Los factores de capacidad de las estaciones se encuentran entre el 40 y el 60%, y se sitúan a profundidades de entre 20 y 30 m, lo que les permite no verse afectadas por las tormentas. El agua, al ser un fluido 1.000 veces más denso que el aire, necesita sólo tener una velocidad de 2 a 3 m/s para ser apropiada para el diseño de generadores de energía, equivalentes a entre 11 y 12 m/s en el aire.

Los lugares más adecuados para desarrollar este tipo de energía en Europa se encuentran en el Reino Unido. En el estrecho de Gibraltar, por culpa del tráfico marítimo, resulta más difícil su aplicación [figura 2.5]. Existen tres tipos de generadores [figura 2.3]:

Rotores de flujo axial: situados en la misma dirección del flujo. Existen multitud de sistemas de posicionamiento.

Rotores de eje vertical: reciben el flujo transversalmente, al igual que los aerogeneradores.

Alerones basculantes (hidroalas): aprovechan la diferencia de presión entre las láminas de agua para crear un movimiento ascendente y descendente en los alerones.

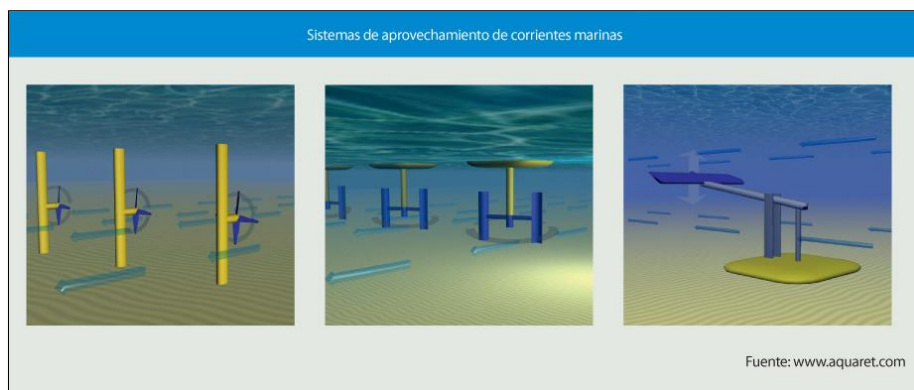


Figura 2.3. Sistemas de aprovechamiento de corrientes marinas (Fuente: [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com))

### 2.1.1.3. Energía térmica oceánica

La diferencia de temperatura entre la superficie del mar y el fondo de éste (que suele estar en torno a los 4°C) puede alcanzar los 20°C. En estos casos, este gradiente térmico se puede aprovechar mediante máquinas térmicas para la producción de energía. Para ello, se construyen tubos con una profundidad del orden de los 1.000 m en zonas tropicales [figuras 2.4 y 2.6]. Se puede alcanzar una potencia global de 40.000 TW al año.

Entre sus ventajas se incluye que dispone de una alta densidad energética, que el gradiente térmico es constante y predecible, y que la tecnología no necesita de grandes avances. Sin embargo, el trabajo a esos niveles de profundidad resulta costoso y el recurso se encuentra alejado de los puntos de consumo.

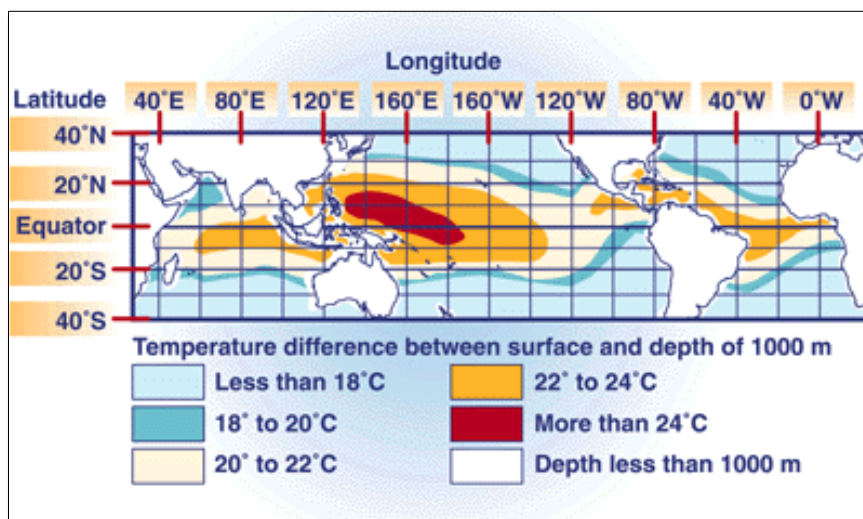


Figura 2.4. Mapa de las regiones con los mayores gradientes térmicos (Fuente: [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov))

Se han realizado instalaciones experimentales en Japón, Hawaii e India. En esta última, la potencia de la planta alcanzó 1 MW de potencia instalada.

### 2.1.1.4. Energía osmótica

La energía osmótica (o energía azul) es la energía que aprovecha el gradiente salino, es decir, la diferencia de salinidad, en las desembocaduras de los ríos entre el agua marina y la fluvial. Este gradiente se mantiene gracias a la evaporación que sufren los océanos y la lluvia que reciben los ríos. Alrededor del mundo se estima que tiene una potencia de 1.400 TW anuales.

Existen dos tipos de tecnología:

Retardo de la presión osmótica: consiste en bombear agua marina hasta un depósito donde la presión es inferior a la presión osmótica entre el agua dulce y la salada. El agua dulce atraviesa una membrana semipermeable que hace incrementar la presión. Este aumento es aprovechado por un sistema turbogenerador. Es el método más empleado.

Electrodiálisis inversa: consiste en usar membranas que difundan los iones de sal y creen una corriente de baja tensión. Así se crea directamente electricidad en corriente continua.

Las ventajas de este tipo de energía son la alta densidad energética y la ausencia de un carácter cíclico, lo que permite una producción continua y predecible. Como desventajas cabe destacar el elevado coste de las membranas y el impacto medioambiental en las desembocaduras de los ríos.

La primera planta piloto con tecnología de osmosis inversa fue inaugurada en Noruega en el 2009, con una potencia instalada de 2 kW, con fines de investigación [figura 2.5].

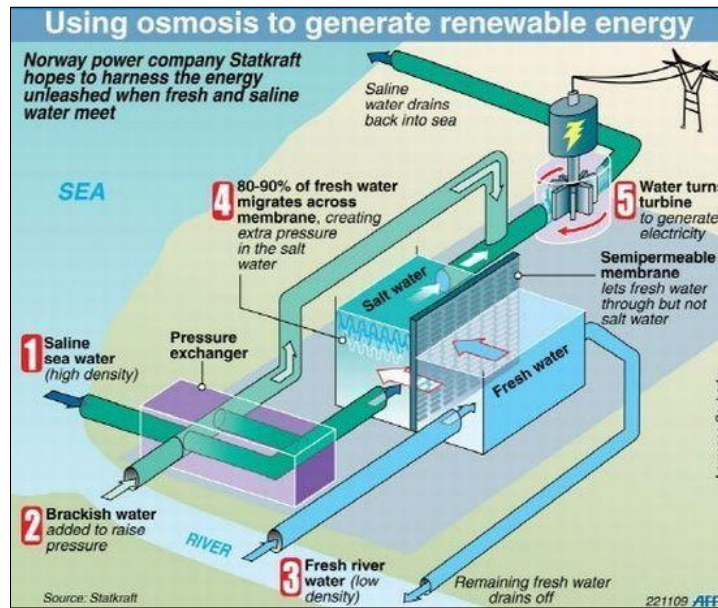


Figura 2.5. Planta piloto de osmosis inversa en Noruega (Fuente: [www.statkraft.com](http://www.statkraft.com))

### 2.1.1.5. Energía de las olas

Las olas son generadas mayoritariamente a partir del rozamiento del viento en su superficie, para luego recorrer grandes distancias hasta alcanzar las costas. Tanto su energía cinética como potencial son captadas por diversos tipos de dispositivos para transformarla en energía eléctrica. Esta energía depende de tres factores: la velocidad del viento, que determinará su intensidad, el periodo durante el cual esté actuando y el *fetch*, longitud marítima donde el viento sopla sin cambios significativos en la misma dirección y sin encontrar obstáculos.

Pese a que actualmente se encuentra en fase de pruebas, esta energía tuvo sus orígenes en el siglo XIII en China, donde ya la utilizaban en los molinos. La primera patente data de finales del siglo XVIII en Francia, donde usaron una balsa con un sistema similar al de las actuales boyas. Ya a principios del siglo XX, se consiguió generar 1 kW mediante un sistema hidroneumático. El desarrollo se vio afectado por la masiva explotación del petróleo, pero en el último cuarto del siglo XX se empezaron a apoyar investigaciones en este campo. En la última década varias empresas comenzaron a trabajar en el diseño y desarrollo de dispositivos, y la primera planta en fase comercial llegó a la costa norte portuguesa en el 2008.

Existen varios tipos de olas: capilares, de largo periodo y de gravedad. Las primeras son causadas por el viento y contrapuestas por la tensión superficial del agua. Las segundas son causadas por terremotos, tormentas y las fuerzas gravitatorias del sol y la luna, y contrapuestas por el efecto Coriolis. Las terceras, las de más interés, son causadas por el viento y contrapuestas por la fuerza de la gravedad. Estas últimas son las que contienen una energía mayor y, por lo tanto, son las que hacen de la energía del oleaje una energía factible para la producción de electricidad. Esta producción alcanza aproximadamente los 3,5 TW de potencia anual, de los cuales una gran parte de ellos, 2 TW, serían aprovechables.

A diferencia de otros tipos de energía, como la de las corrientes, se puede aprovechar en un gran número de localizaciones [figuras 2.6 y 3.2]. Este estudio pretende analizar si uno de estos lugares es la costa marroquí, de modo que el interés se centra en la energía del oleaje en lugar del resto de casos. Esta energía marina es la que cuenta con mayor número de desarrollos, aunque éstos aún estén en fase experimental o de pruebas piloto, sin mucha comercialización. Sin embargo, es la que tiene mayor potencial tanto en España como a nivel mundial. En uno de los siguientes apartados [capítulo 2.1.3] se detallan los distintos tipos de dispositivos mecánicos capaces de aprovechar este tipo de energía.

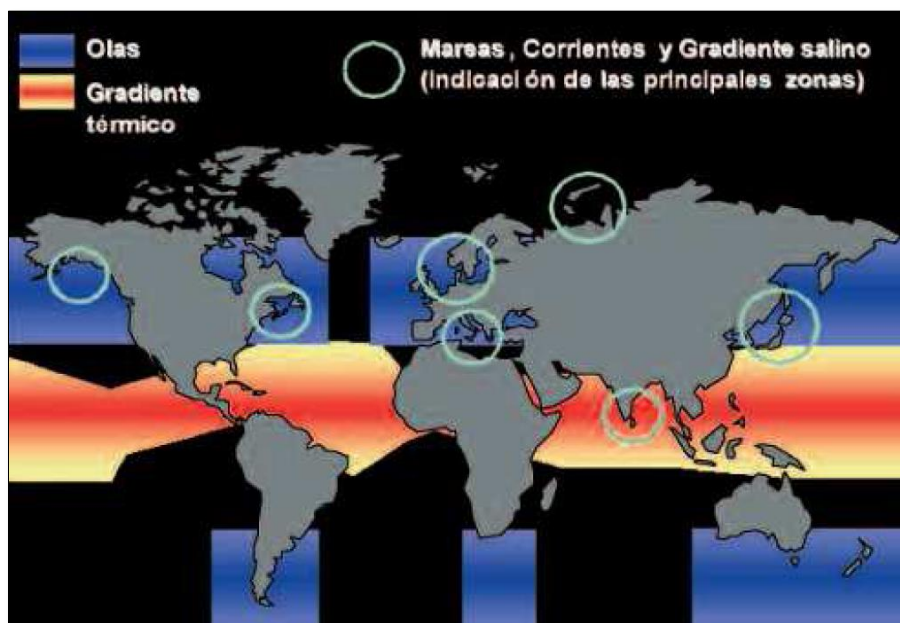


Figura 2.6. Distribución mundial de las energías marinas (Fuente: [37])

Las zonas que se predisponen como las más energéticas suelen ser las que tienen un mayor *fetch*, hecho que se da básicamente en los grandes océanos. En ellos se encuentran islas aisladas o archipiélagos, regiones en las que el acceso a fuentes energéticas convencionales puede resultar complicado dada la particularidad de su situación geográfica. En estos casos, una energía renovable como es la del oleaje puede ayudar a abastecer los recursos energéticos necesarios e incluso a hacer de la isla un lugar autosuficiente energéticamente. Numerosos estudios [capítulo 2.2] ponen de manifiesto este hecho. Por otra parte, en regiones costeras de países con grandes territorios, como es el caso de Marruecos, esta energía únicamente podría alimentar a zonas próximas al litoral. Otras energías, como la eólica o la solar serían las encargadas de suministrar el resto de necesidades. Ese es el gran objetivo del plan energético

marroquí para el año 2020 [capítulo 2.3], en el que se pretende que el 42% del aporte energético provenga de fuentes renovables. El modo adecuado para que esto se cumpla es que estas energías renovables no compitan entre ellas, sino que se complementen.

Tal como se ha indicado, la energía del oleaje es la que cuenta con mayor número de dispositivos desarrollados al ser una de las que tiene más potencial. Este dato se puede contrastar en la siguiente tabla [tabla 2.1]. Se puede observar que la energía térmica y la osmótica tienen un enorme potencial, pero se desconoce la factibilidad de su explotación, es decir, si ese potencial se podría aprovechar en gran medida o no. Este hecho, añadido a que los costes de explotación, el impacto ambiental y otras desventajas, las descartan como la mejor opción. Por otra parte, tanto la energía de las corrientes marinas como la mareomotriz sí que tienen un potencial aprovechable conocido, pero inferior a la del oleaje. Además, la mareomotriz tiene un gran impacto medioambiental. Todo esto deja a la energía del oleaje como la más indicada para postularse como la energía marina con mayor potencial.

<b>Energía Característica</b>	Mareomotriz	Corrientes	Térmica	Osmótica	<b>Oleaje</b>
Potencial disponible	3,7 TW	5-8 TW	40.000 TW	1.400 TW	<b>3-3,5 TW</b>
Potencial aprovechable	15 GW	30 GW	-	-	<b>2 TW</b>

*Tabla 2.1. Potencial global de las principales fuentes renovables marinas en comparación con la energía de las olas (Fuente: [37, 38])*

En comparación con otras energías renovables (la solar y la eólica), la energía de las olas tiene ciertas ventajas y desventajas en términos energéticos y económicos.

<b>Energía Característica</b>	Solar	Eólica	<b>Oleaje</b>
Recursos disponibles	120.000 TW	300-870 TW	<b>3-3,5 TW</b>
Recursos aprovechables	300 TW	72 TW	<b>2 TW</b>
Intensidad media	100-200 W/m <sup>2</sup>	400-600 W/m <sup>2</sup>	<b>2.000-30.000 W/m<sup>2</sup></b>

*Tabla 2.2. Características energéticas globales de dos de las principales fuentes renovables en comparación con la energía de las olas (Fuente: [37, 38])*

Como se expone en la tabla anterior [tabla 2.2], el potencial de la energía del oleaje es inferior al de las otras dos energías. Esto es debido a que la energía del oleaje sólo se puede encontrar en grandes cantidades en determinadas zonas de los mares y los océanos. En cambio, la energía solar, en términos generales, tiene una potencia constante similar en función de la latitud a la que se encuentre, indistintamente de su longitud en el globo terráqueo. En el caso de la energía eólica, en cualquier parte del planeta se puede hallar en mayor o en menor medida.

Sin embargo, la energía del oleaje puede aprovechar un mayor porcentaje del potencial del que dispone, que llega a ser dos terceras partes de éste. La energía del viento, por su parte,

aprovecha entre una quinta y una décima parte de su potencial. La energía solar, en comparación, es con diferencia la más desaprovechada, ya que únicamente una de cada cuatrocientas partes de su recurso es aprovechable. Aun así, es la que dispone de un mayor potencial energético.

En cuanto a la intensidad media, se observa que la energía de las olas es claramente superior en este aspecto, aunque cabe destacar que la acotación de esta característica del oleaje es muy amplia. Se alcanzan valores entre 5 y 50 veces mayores que los de la energía eólica, y entre 20 y 150 veces mayores que los de la solar. La razón de esto es que la energía del oleaje se podría considerar energía eólica concentrada, ya que el motivo de su origen es el mismo viento.

La explotación de la energía de las olas del mar en un futuro próximo se irá convirtiendo poco a poco en una realidad más factible. Las desventajas que presenta se irán atenuando hasta que las ventajas ganen la partida [tabla 2.3].

Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuente renovable (limpia e inagotable)</li> <li>- Potencial energético altamente aprovechable</li> <li>- Fenómeno predecible, constante y de elevada concentración</li> <li>- Punto de instalación flexible</li> </ul>
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costes de instalación y funcionamiento</li> <li>- Tecnología en fase de pruebas</li> <li>- Poca resistencia frente a temporales</li> <li>- Impacto ambiental (básicamente en localizaciones costeras)</li> </ul>

*Tabla 2.3. Ventajas e inconvenientes de la energía del oleaje*

A medida que pasen los años se irán mejorando los dispositivos que se desarrollen mediante la investigación y las pruebas. Cuando esto suceda, los costes de instalación se verán reducidos (los costes de mantenimiento son relativamente bajos, de modo que no exhiben una gran preocupación) y este tipo de energía llegará a ser amortizable. Actualmente, según datos publicados por la Comisión Europea (2002), el coste de inversión ronda los 12.000€/kW (en función del tipo de dispositivo), bastante superior a la de otras fuentes renovables como la solar (6.000€/kW) o la eólica (1.300€/kW). Sin embargo, según esta misma fuente, para el año 2020 el coste del kW en los últimos 15 años se habrá visto reducido hasta tres o cuatro veces menos. En lo referente al impacto medioambiental, el principal problema se presenta en las instalaciones cercanas a la costa. Dado que una ventaja con la que cuenta esta fuente es que la ubicación de su instalación es muy flexible, si éstas se intentan realizar en zonas de aguas profundas, el impacto sería relativamente bajo.

Ante este panorama, tanto a nivel ambiental para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y explotar las fuentes renovables de las que dispone el planeta, como por razones de desarrollo tecnológico y cuestiones económicas a largo plazo, la energía del oleaje se podría postular como un buen complemento del elenco actual de energías renovables. Apostar por este tipo de energía podría ser una de las claves para conseguir un futuro limpio y sostenible, un futuro mejor.

### 2.1.2. Potencia del oleaje

El oleaje es un fenómeno complejo y aleatorio. Si se observan los registros de desplazamientos en un mismo punto se puede comprobar que el oleaje en realidad es un fenómeno irregular.

Cuando se evalúa el potencial energético de las olas se trabaja con datos a corto plazo, los cuales son acotados en intervalos de tiempo relativamente cortos (1-3 horas), pero lo suficientemente duraderos para ser fiables estadísticamente (régimen medio). Estos registros o acotaciones se denominan estados de mar.

En estas evaluaciones con lo que en realidad se trabaja es con el potencial medio de energía de un estado de mar concreto. Para ello se puede utilizar la descripción estadística (u ola a ola) o la descripción espectral del oleaje. Por el tipo de datos con los que se trabaja, obtenidos a partir del modelado numérico, se ha utilizado la teoría de la descripción espectral del oleaje.

Un espectro de energía  $S(\omega)$  ( $\omega=2\pi/T$ ) representa la energía asociada a cada una de las frecuencias del oleaje (irregular) estudiado, pudiéndose distinguir dos extremos: espectros de oleaje de banda ancha y espectros de oleaje de banda estrecha. Un espectro de banda estrecha se caracteriza por presentar un rango de frecuencias con contenido energético limitado y es característico de estados de mar desarrollados (fuera de la zona de generación del oleaje) como por ejemplo el oleaje de tipo SWELL. Por el contrario, el espectro de banda ancha presenta una gran variedad de frecuencias y se corresponde con estados de mar más irregulares típicos de estados de mar de tipo SEA o *fetch* limitado. De forma general el espectro de energía será indicativo del estado de mar observado pudiéndose obtener espectros bimodales indicativos de estados de mar de tipo SEA y SWELL existentes de forma simultánea.

Para conocer la potencia del oleaje de un estado de mar se ha de tener conocimiento de una serie de parámetros que se detallan a continuación.

El momento espectral de orden  $n$  viene definido por la siguiente expresión:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega$$

Por lo tanto, el momento espectral de orden 0 será:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega$$

siendo además la varianza ( $\sigma^2$ ) del registro.

A partir de una serie de condiciones (espectro de banda estrecha), se puede definir la altura de ola significativa (espectral) como:

$$H_s \cong 4\sqrt{m_0}$$



Y el período energético como:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$$

La energía media total por unidad de área viene definida de la siguiente forma para un estado de mar:

$$\bar{E} = \rho g \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega$$

de modo que el flujo de energía, también denominado potencia del oleaje, será:

$$\bar{P} = \bar{E} c_g = \rho g \int_0^{\infty} S(\omega) c_g d\omega = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{S(\omega)}{\omega} d\omega$$

donde la celeridad de grupo ( $c_g$ ), al tratarse en el caso del estudio de aguas profundas ( $kh > \pi$  [ $h/L > 0.5$ ]) se ha definido como:

$$c_{g0} = \frac{c_0}{2} = \frac{gT}{4\pi}$$

Para resolver la ecuación de la potencia del oleaje se han de aplicar las definiciones de los parámetros de altura de ola significativa (en concreto, su cuadrado) y de período energético y tener en cuenta el momento espectral de orden -1:

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{S(\omega)}{\omega} d\omega = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{-1} = \frac{\rho g^2}{4\pi} \frac{1}{16} \frac{m_{-1}}{m_0} 16m_0 = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2$$

Para simplificar la ecuación obtenida se pueden aplicar los valores de los parámetros conocidos, tales como la densidad del fluido ( $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ) y la gravedad ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ), de modo que finalmente quede:

$$\bar{P} \cong 490,6 T_e H_s^2 \text{ (W/m)}$$

Para aplicar esta ecuación en el tratamiento de los datos del estudio es preferible que esté expresada en kW/m (metro de cresta de ola), así que finalmente queda de la siguiente forma:

$$\bar{P} \cong 0,491 T_e H_s^2 \text{ (kW/m)}$$

Los datos utilizados facilitan varios parámetros básicos del oleaje, como la altura de ola significativa o la dirección del oleaje. Sin embargo, el período energético no es uno de ellos. Para calcularlo se ha de partir de un parámetro conocido, como es el período pico ( $T_p$ ), que viene definido como el período para el cual la función de densidad espectral alcanza su máximo valor, de modo que indica el período que tiene más energía asociada. El período energético se define en función del período pico como  $T_e = \alpha T_p$  donde  $\alpha$  es un coeficiente variable ( $\alpha \in [0,86, 1]$ ) en función de la anchura del espectro de oleaje. Para el caso del presente estudio se ha determinado un valor aproximado de 0,9 en función de otros estudios realizados.

### 2.1.3. Convertidores de energía del oleaje

Actualmente coexisten numerosos sistemas de captación de energía del oleaje. Al encontrarse en fase de desarrollo se han diseñado multitud de dispositivos diferentes con el mismo fin. Cada uno sigue un principio diferente, y cada uno ofrece ventajas e inconvenientes respecto a los demás. Al no converger en un único sistema, los convertidores de energía del oleaje presentan un amplio abanico de posibilidades. En función de sus características, cada uno puede ser apropiado en determinadas circunstancias. Sin embargo, encontrar un sistema en común ayudaría a lograr el objetivo de llegar a la comercialización de estos aparatos. Como se ha comentado anteriormente [capítulo 2.1.1], en la actualidad ya existen algunas plantas en fase comercial, como la que se encuentra en la costa norte de Portugal. Todavía faltan años para que la explotación de la energía del oleaje sea amortizable y comerciable, pero los últimos desarrollos parecen indicar que cada vez este momento se encuentra más próximo.

Para clasificar la gran diversidad de dispositivos WEC que existen actualmente se han dividido según tres criterios:

- Ubicación [figura 2.7]:

Este criterio fue adoptado en el proyecto europeo WaveNet que clasificó los dispositivos en función de su ubicación relativa a la costa. Existen tres generaciones, dentro de las cuales hay varias posiciones de los WEC.

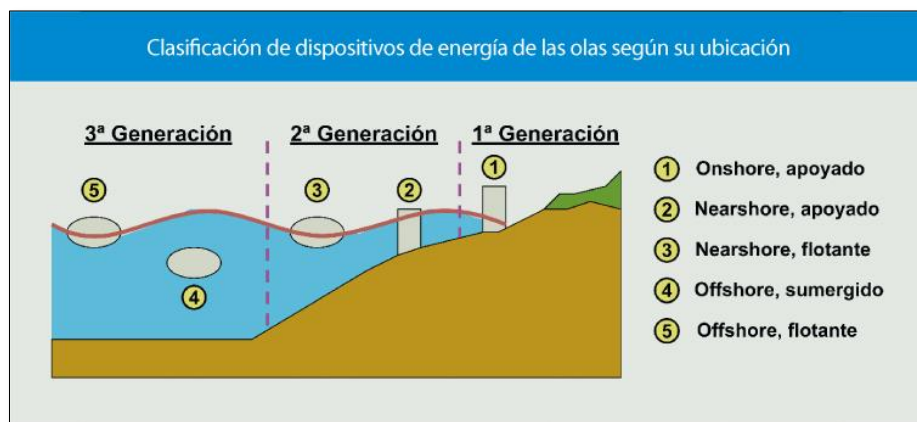


Figura 2.7. Clasificación de los dispositivos de captación de energía de las olas según su posicionamiento relativo a la costa (Fuente: [37])

- Principio de captación [figura 2.8]:

#### Diferencias de presión:

Aprovechamiento del gradiente de presión que genera el oleaje sobre el aire.

- *Columna de aguas oscilante (OWC)*: el movimiento del oleaje hace subir el nivel de agua de una cámara semisumergida abierta en su parte inferior, lo que hace variar el volumen de aire dentro de ella. El flujo activa una turbina unidireccional.

- *Efecto Arquímedes*: su principio de funcionamiento se basa en la fluctuación de la presión estática causada por la oscilación del nivel de agua al paso del oleaje. El mecanismo sufre una oscilación vertical que hace variar la presión de la cámara de aire de su interior, mientras su base se encuentra fija al suelo marino. *Archimedes Wave Swing* es un ejemplo de esta tecnología.

**Cuerpos flotantes:**

Los dispositivos flotantes sufren un movimiento oscilatorio vertical, horizontal, de cabeceo o una combinación de ellos. Pueden tener una referencia externa o relativa entre dos o más cuerpos. *Pelamis* es el dispositivo más desarrollado, cuyo funcionamiento se detalla en el siguiente apartado [capítulo 2.1.3.1] al ser uno de los utilizados en el estudio del oleaje del litoral marroquí.

**Sistemas de rebosamiento y/o impacto:**

La incidencia del oleaje aumenta la energía cinética, potencial o ambas en la estructura. Los sistemas de rebosamiento fuerzan a que el agua supere su estructura, como es el caso de *Wave Dragon*, dispositivo analizado en uno de los siguientes apartados [capítulo 2.1.3.2] al tratarse del otro aparato utilizado en el estudio. Por otra parte, los sistemas de impacto consisten en una estructura articulada o flexible, normalmente cercana a la costa, que reciben la incidencia de las olas, como ocurre con el dispositivo *Oyster*.

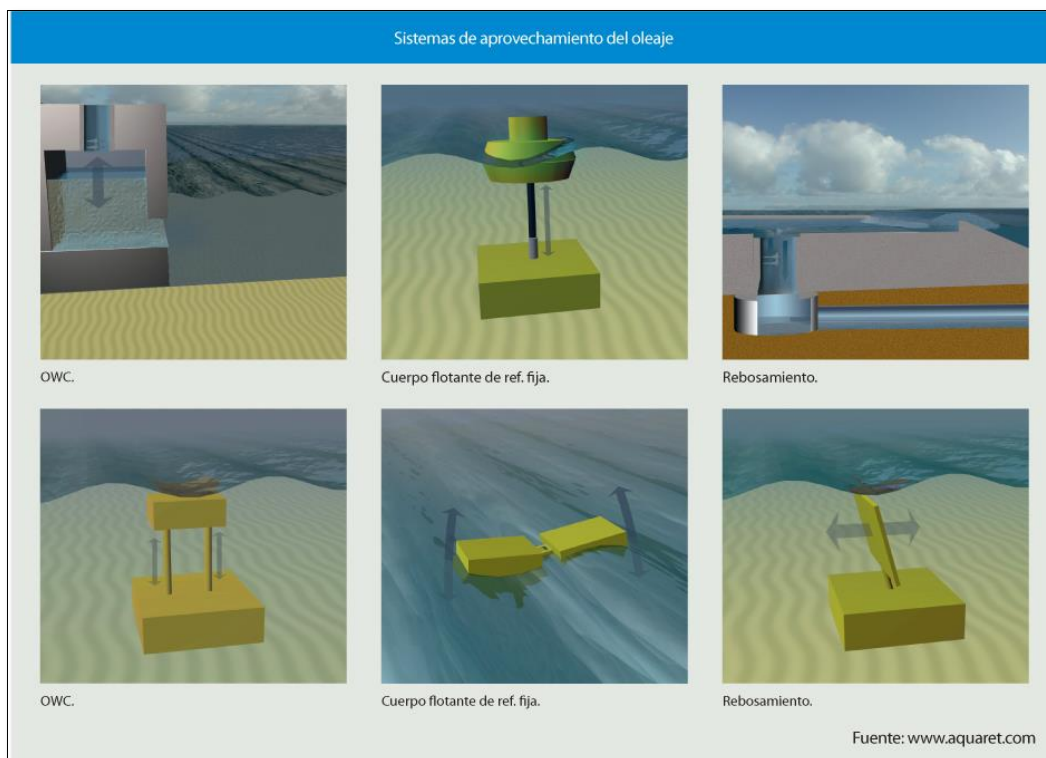


Figura 2.8. Sistemas de aprovechamiento de la energía del oleaje según su forma de captación (Fuente: [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com))

- Tamaño y orientación [figura 2.9]:

**Absorbedores puntuales:**

Se suelen colocar varios dispositivos de este tipo en línea. La dirección del oleaje no les afecta al tener simetría axial. Tienen forma cilíndrica y son estructuras pequeñas en comparación con la longitud de las olas incidentes. Un ejemplo de este sistema tipo boya es *PowerBuoy*.

**Terminadores o totalizadores:**

Se sitúan perpendicularmente a la dirección del oleaje y son de forma alargada. Un dispositivo ideal de este tipo no reflejaría ninguna energía, ya que aprovecharía la totalidad de la que recibiese al captar la energía de una sola vez.

**Atenuadores:**

Se sitúan paralelamente a la dirección del oleaje, de forma alargada. También se denominan absorbedores lineales. Extraen la energía que reciben progresiva y direccionalmente.

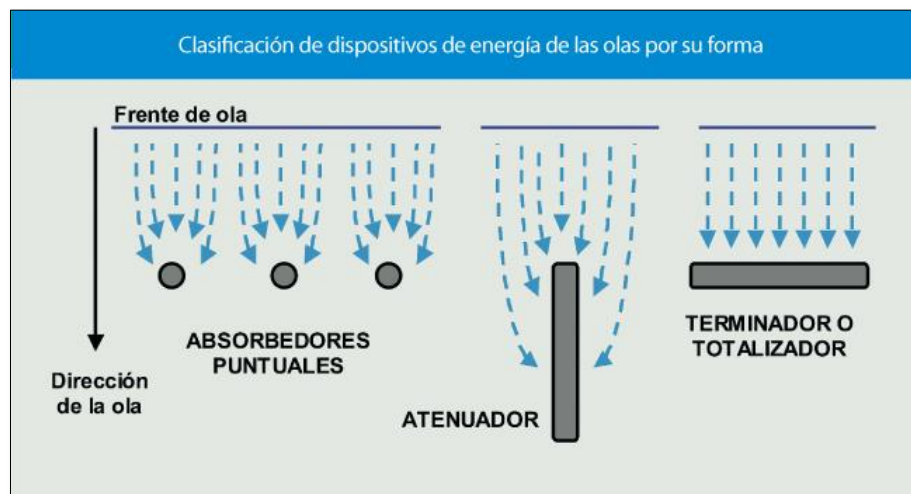


Figura 2.9. Sistemas de aprovechamiento de la energía del oleaje según su tamaño y orientación (Fuente: [37])

Existen otros métodos de clasificar los WECs: según su posición dentro del agua, según el tipo de energía que aprovechan, según su forma, según el uso final de la energía, según el ratio potencia/superficie, etc.

Actualmente hay más de mil patentes de WECs a nivel internacional. La sección de Energías Oceánicas de la Agencia Internacional de la Energía reconoció la existencia de más de setenta dispositivos en fases de desarrollo en el año 2009, pero en la actualidad este número sigue incrementándose. Estos aparatos siguen necesitando el empuje de los sectores de investigación y desarrollo para llegar a la comercialización, donde el propio mercado convergerá este proceso tan divergente, debido a la multitud de dispositivos distintos que coexisten, en un número reducido de tecnologías de aprovechamiento de la energía del oleaje.

### 2.1.3.1. Pelamis

En este estudio se ha comprobado la factibilidad del aprovechamiento de las olas en el litoral marroquí cotejando los resultados teóricos que se obtendrían con la instalación de dos tipos de convertidores de la energía del oleaje (WEC). Uno de ellos es el Pelamis, dispositivo creado por la empresa inglesa PWP (Power Wave Pelamis), con sede en Edimburgo, Escocia desde 1998. Su nombre proviene de su semejanza con la serpiente marina Pelamis, tanto en su apariencia como en su movimiento sinuoso.

El primer modelo (Pelamis P1) a escala real que se instaló y se probó tuvo lugar en el EMEC (European Marine Energy Centre), en 2004. Cuatro años más tarde, en el 2008, en la costa portuguesa de Aguçadoura, se puso en funcionamiento el primer parque de energía del oleaje con tres dispositivos Pelamis. Actualmente hay seis aparatos activos, dos de los cuales del nuevo modelo Pelamis P2 [figura 2.10]. Se trata de un dispositivo de tipo cuerpo flotante.



Figura 2.10. Imagen del modelo Pelamis P2 en funcionamiento (Fuente: [www.emec.org.uk](http://www.emec.org.uk))

La zona de trabajo del Pelamis se encuentra en aguas profundas, de 2 a 10 km de la costa y con profundidades superiores a los 50 m. La potencia máxima alcanza los 750 kW, suficiente para proveer el suministro eléctrico de 500 viviendas cada año. Su factor de capacidad apto ronda entre el 25 y el 40% en función de las condiciones de la zona de operación.

Como se observa en la imagen [figura 2.10], se trata de una estructura articulada semisumergida compuesta por varios módulos cilíndricos unidos mediante juntas con bisagras. El primer modelo tiene una longitud total de 150 m, con un diámetro de 3,5 m y un peso de 700 T. Está compuesto por cuatro módulos. El segundo modelo, más grande y pesado, tiene una longitud de 180 m entre los cinco módulos, un diámetro de 4 m y un peso de 1350 T.

El principio de funcionamiento del Pelamis se basa en el accionamiento de dos grupos de dos cilindros hidráulicos cada uno, localizados en las articulaciones entre los módulos, que aprovechan el movimiento local en las dos orientaciones (vertical y horizontal) inducido por las olas que hace girar los ejes de rotación [figura 2.11]. Estas oscilaciones son transformadas de energía mecánica a eléctrica mediante un PCM (Power Conversion Module), que bombea líquido de un depósito de baja presión a uno de alta presión. A su vez, un generador hidráulico trasvasa líquido de uno de los depósitos a otro generando así electricidad. Esta electricidad es enviada desde cada módulo al módulo principal y desde ahí a un cable que recorre el lecho marino o previamente a un hub, en el caso de que haya varios dispositivos, y de ahí a la costa.

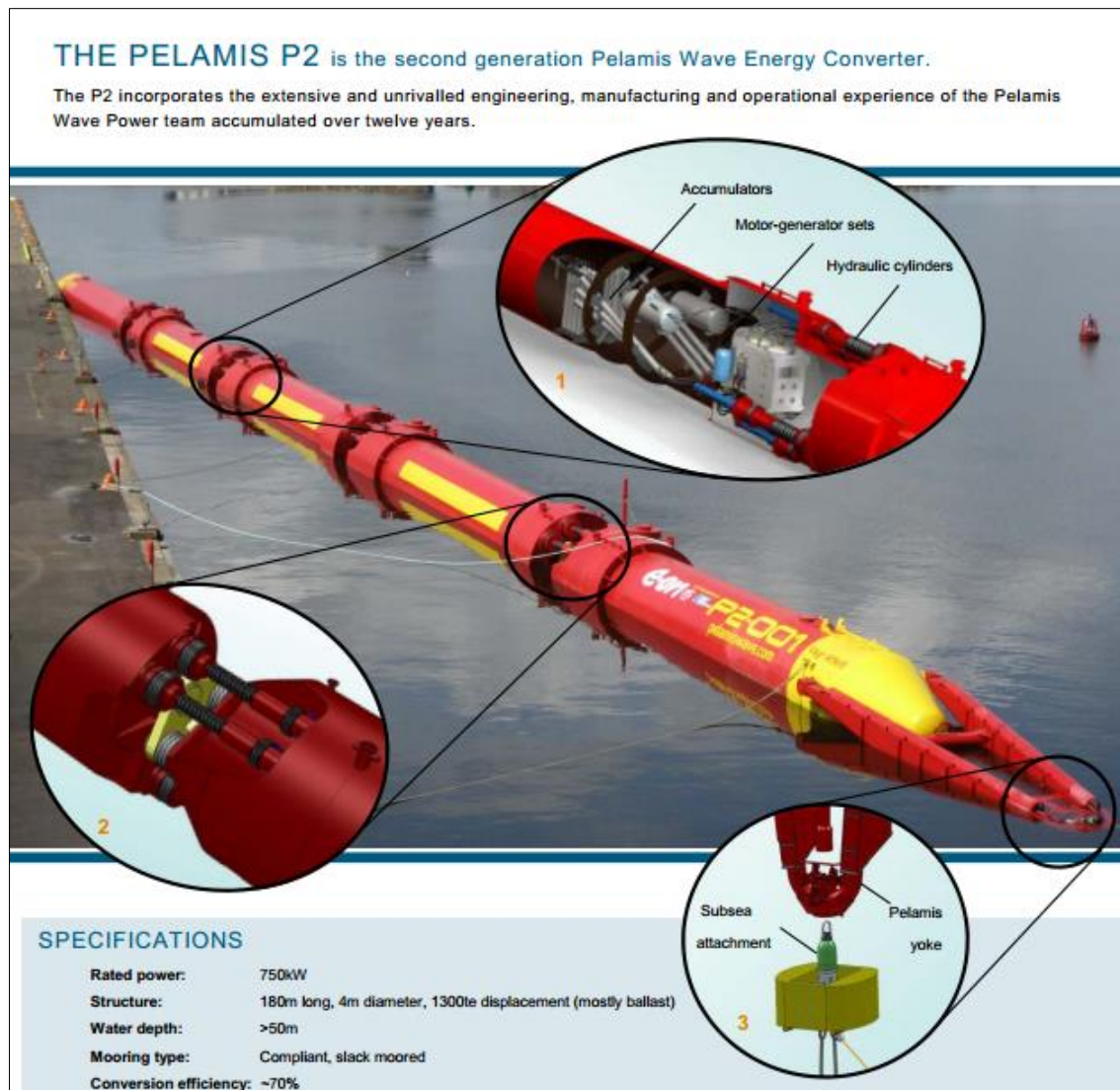


Figura 2.11. Imagen detallada del funcionamiento mecánico interno del dispositivo Pelamis P2  
(Fuente: [www.pelamiswave.com](http://www.pelamiswave.com))

El Pelamis es uno de los convertidores de energía del oleaje más desarrollados. De hecho, ya se encuentra en fase comercial. Esto se debe a la gran cantidad de ventajas con las que cuenta. En términos generales, algunas de ellas son:

- Genera electricidad de una forma eficiente y constante gracias a unos acumuladores de alta presión a pesar de recibir un oleaje cambiante.
- Su funcionamiento se sitúa en el principio de la línea de absorción, al contrario que una boya que actúa puntualmente, lo que le permite triplicar su potencia al recorrer la ola toda la longitud del dispositivo.
- Cuenta con un sistema de recopilación de datos para desarrollar estrategias más eficientes y flexibles de cara a mejoras y a futuros modelos.
- Su impacto visual y medioambiental es bajo. Únicamente precisa de dos puntos de anclaje y el fluido del circuito hidráulico es biodegradable y no es tóxico para el ecosistema marino.

- Su mantenimiento es más sencillo gracias a que se puede traer el dispositivo al taller y no al revés.
- Puede operar a gran variedad de profundidades.
- Cuenta con limitadores de potencia para cuando los rangos de entrada de energía sean muy superiores a los de la operatividad habitual. El dispositivo penetra las olas de demasiada potencia como haría un pato o un surfista. Esto le permite funcionar normal y constantemente cuando hay temporales extremos y alargar su durabilidad y resistencia.
- Se pueden controlar las juntas para que el mecanismo entre en resonancia forzosamente, activándolo cuando sea requerido y evitándolo en condiciones extremas.
- Puede aprovechar una economía de escala, ya que, según un estudio de la Universidad de San Francisco [39], la instalación de un dispositivo ronda los 5,6 millones de dólares, mientras que en un parque de energía del oleaje con 213 aparatos, el precio unitario quedaría en 1,3 millones de dólares (279 millones de dólares en total).
- El rendimiento de generación eléctrica es ligeramente superior al 80%, lo que supone unas pérdidas de menos del 20% de potencia total. Los mayores rendimientos se dan cuando la potencia incidente es baja.

Todos los dispositivos Pelamis que se encuentran actualmente operativos se encuentran en las costas del norte del océano Atlántico, en concreto en las inglesas y las portuguesas. A continuación se detallan estas instalaciones:

- CEO (Aguçadoura, Portugal)  
Primera planta en comercialización que cuenta con tres dispositivos Pelamis P1, instalados en 2008. El proyecto lo llevan conjuntamente las empresas CEO (Companhia da Energia Oceânica SA), PWP, y la portuguesa Enersis. El coste inicial fue de 11,5 millones de dólares. Se pretende alcanzar una potencia total instalada de 20 MW con la instalación de un total de 26 dispositivos.
- E.ON (EMEC, Reino Unido)  
Durante tres años desde el año 2010 se estuvo probando en el EMEC un dispositivo Pelamis P2 en un proyecto liderado por la empresa alemana E.ON.
- SPR (EMEC, Reino Unido)  
Al igual que E.ON, la empresa inglesa SPR (Scottish Power Renewable) está realizando pruebas a un dispositivo Pelamis desde el año 2011. Las pruebas consisten en una serie de estados climáticos en los que se va incrementando la altura de ola. El objetivo es instalar un parque de 66 dispositivos en Orkney, Escocia, que tendrá una potencia total instalada de 50 MW.
- Bernerá (Islas Hébridias Exteriores, Escocia, Reino Unido)  
En este archipiélago se pretende instalar la planta Bernera, que a finales de 2015 contará con una potencia de 20 MW.
- Vattenfall (Islas Shetland, Escocia, Reino Unido)  
El proyecto Aegir, llevado a cabo por la empresa sueca Vattenfall y PWP, pretende instalar un parque de Pelamis al suroeste del archipiélago en un punto estratégico para aprovechar las futuras instalaciones eléctricas. Contará con 10 MW.

### 2.1.3.2. Wave Dragon

El otro convertidor de energía del oleaje (WEC) con el que se trabaja en este estudio es el Wave Dragon. Su nacimiento fue gracias al programa de energía marítima danesa, del cual obtuvo un fondo de 6 millones de euros. Su nombre proviene de un malentendido lingüístico, ya que un compañero del propietario de la compañía que lo inventó le dio el nombre de cometa por su semejanza a éste, pero en danés se utiliza la misma palabra para denominar al dragón.

El primer prototipo en fase de pruebas se instaló en la zona de Nissum Bredning, Dinamarca, a principios de siglo [figura 2.12]. No ha llegado a la fase comercial, ya que los prototipos siguen optimizándose.



Figura 2.12. Imagen del prototipo de Wave Dragon en Dinamarca (Fuente: [stateofgreen.com](http://stateofgreen.com))

El principio de funcionamiento de Wave Dragon está basado en las centrales hidroeléctricas. Sigue un primer proceso de rebase y almacenamiento (es un dispositivo tipo sistema de rebosamiento), para el cual unos brazos de 145 m reflejan las olas abarcando una zona de 300 m de ancho. De esta forma la concentración de oleaje es mayor. Después, las olas ascienden por una rampa de forma elíptica ligeramente corta e inclinada. El motivo de su forma, comprobada y optimizada con los modelos de prueba, es que incrementa de manera considerable el rebase del agua. El segundo proceso conduce el agua recogida a unos grandes depósitos y la hace circular por unas turbinas de baja presión (Kaplan) aprovechando la energía potencial que se ha adquirido para generar energía eléctrica [figura 2.13].

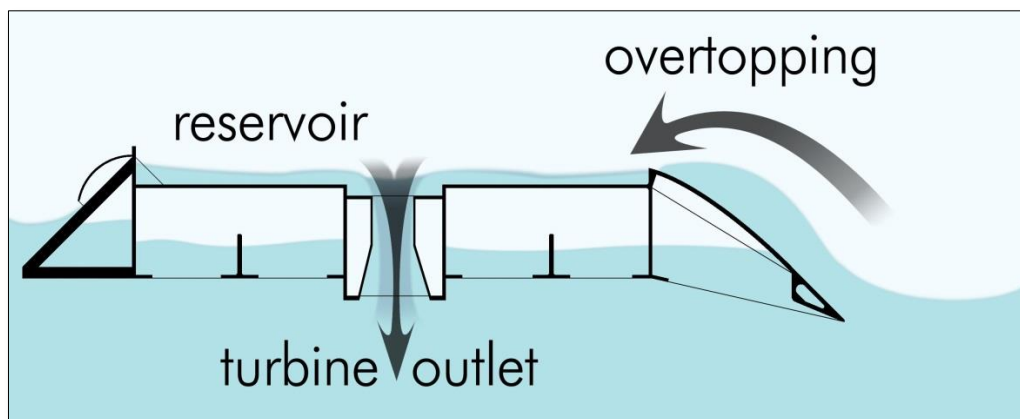


Figura 2.13. Principio de funcionamiento de Wave Dragon (Fuente: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org))



El dispositivo cuenta, además, con unas cámaras de aire presurizadas para mantener una línea de flotación adecuada en función del tipo de oleaje incidente. También cuenta con un sistema de navegación para posicionarse en la orientación óptima en función de la dirección del oleaje.

Existen tres modelos de Wave Dragon de distinto tamaño (aparte del prototipo), cada uno diseñado para abarcar un determinado potencial de oleaje dependiendo de la zona en la que opere. El modelo de menores dimensiones trabaja con olas con una potencia de 24 kW/m, el mediano con olas de 36 kW/m y el más grande con olas de 48 kW/m [tabla 2.4]. El modelo con el que se ha trabajado en este estudio es el que recibe olas de 36 kW/m, ya que la zona de estudio no presenta un clima de oleaje extremo, pero tampoco calmado. La potencia total valorada para este dispositivo es de 7 MW.

Modelo de Wave Dragon	Prototipo			
	0,4 kW/m	24 kW/m	36 kW/m	48 kW/m
	Nissum Bredning			
Peso	237 T	22.000 T	33.000 T	54.000 T
Anchura y longitud	58 x 33 m	260 x 150 m	300 x 170 m	390 x 220 m
Longitud reflectores de olas	28 m	126 m	145 m	190 m
Altura	3,6 m	16 m	17.5 m	19 m
Volumen depósito	55 m <sup>3</sup>	5.000 m <sup>3</sup>	8,000 m <sup>3</sup>	14,000 m <sup>3</sup>
Número de turbinas	7	16	16 - 20	16 - 24
Generadores	7 x 2,3 kW	16 x 250 kW	16 - 20 x 350 - 440 kW	16 - 24 x 460 - 700 kW
Potencia	20 kW	4 MW	7 MW	11 MW
Producción anual	-	12 GWh	20 GWh	35 GWh
Profundidad aguas	6 m	> 20 m	> 25 m	> 30 m

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas de los distintos modelos de Wave Dragon

(Fuente: [www.wavedragon.net](http://www.wavedragon.net))

La construcción del Wave Dragon es sencilla y robusta, ya que no cuenta con partes móviles, como podrían ser mecanismos neumáticos, a excepción de las turbinas. Este hecho supone una ventaja, ya que su resistencia a condiciones de clima extremo es mayor, permitiendo así la operación en zonas offshore. Por otra parte, la complejidad del dispositivo radica en el modelado de datos para optimizar la forma de la rampa de ascensión de la ola para aumentar el rebase del agua. Su anclaje se realiza en aguas profundas (como se da en el caso del estudio), preferiblemente en zonas de más de 40 m de profundidad. De esta forma aprovecha la potencia del oleaje antes de que ésta se vea reducida al aproximarse a la costa, donde se producirían pérdidas de energía.

El dispositivo cuenta con entre 16 y 24 turbinas Kaplan dependiendo del modelo. Éstas aprovechan la circulación del agua por gravedad (hidroturbinas) para rotar y generar electricidad mediante un generador que tienen acoplado. Sus hélices son de pala fija, con un sistema de arranque-parada independiente para dar mayor estabilidad energética. En comparación con las usadas en las centrales hidroeléctricas durante más de 80 años, las turbinas del Wave Dragon se han reducido a la mitad de su tamaño, mientras que su sistema de arranque va por sifonado y no a través de una compuerta accionada por cilindro.

El precio de producción de este convertidor de energía del oleaje varía en función del modelo. A mayor tamaño de dispositivo, menor precio unitario. En concreto, para el modelo de 24 kW/m el precio es de 0,054 €/kWh, para el de 36 kW/m es de 0,040 €/kWh y para el de 48 kW/m es de 0,030 €/kWh. Esta cota de precios permitiría al Wave Dragon entrar en el mercado para competir al nivel de otras energías renovables, o para complementarlas. Para poder alcanzar una producción óptima el número de dispositivos ideal para formar un parque de energía del oleaje se encontraría entre 10 y 200. Con únicamente 7 dispositivos en red, que ocuparían un área de 3,2 km<sup>2</sup>, se podría abastecer energéticamente entre 40.000 y 60.000 hogares con una potencia de entre 50 y 80 MW. La extensión de este parque equivaldría al 75% del espacio que requeriría un parque eólico de la misma potencia instalada. Además, el impacto visual sería prácticamente nulo, a diferencia del parque eólico.

La crisis económica ha influido bastante en el progreso de las investigaciones para poder llegar a la fase comercial del dispositivo, ya que en los últimos años los investigadores se han dedicado más bien a buscar recursos para poder financiar sus proyectos. A pesar de ello, varios países trabajan con prototipos y modelos en fase de pruebas, para en un futuro incorporar esta tecnología si resultase factible. Estos modelos se detallan a continuación:

- Nissum Bredning (Dinamarca)  
Como se ha indicado al principio de este apartado, fue el primer prototipo en fase de pruebas que se instaló en el año 2003. Previamente se trabajó con modelos a escala reducida. Se probó durante dos años y se cambió por otro prototipo modificado que sufrió tareas de reparación y mantenimiento. Este modelo trabaja con oleaje de 24 kW/m, de modo que su potencia total instalada es de 4 MW.
- Milford Haven (Gales, Reino Unido)  
Se instaló un dispositivo precomercial con la idea de hacerlo comercial a partir del año 2009 en función de los resultados que arrojasen los estudios a realizar durante un período de 3 a 5 años. Su lugar de implantación se encontraba a 3-5 km de la costa suroeste escocesa, con una extensión de 0,25 km<sup>2</sup>. Este modelo era de 36 kW/m y una potencia total de 7 MW, pudiendo abastecer a 6.000 hogares. Sin embargo, la muerte del dueño de la empresa colaboradora detuvo el proyecto y desde entonces sigue buscando financiación.
- Mar del Norte (Dinamarca)  
El modelo con el que se trabaja en esta localización desde 2011 es más pequeño que el resto, y tiene una potencia total de 1,5 MW. Se ha trabajado con un prototipo a escala reducido durante más de 20.000 h. Su principal ventaja es que, a diferencia de los modelos más grandes, se adapta mejor a climas marítimos más calmados.
- São Pedro de Moel (Portugal)  
Juntamente con la empresa TecDragon, se formó un plan con investigadores portugueses y alemanes para poder desarrollar un proyecto de energía del oleaje en las costas portuguesas. La idea cogió fuerza al tener Portugal un gobierno proactivo y a que el clima de oleaje parecía el indicado. Se pretendía que se alcanzase una potencia de 50 MW. Sin embargo, tras experimentar durante tres años, se concluyó que la energía que se alcanzaba era ínfima, aunque se trabajará con un segundo prototipo.



realidad. De hecho, en la costa europea ya se han puesto en marcha proyectos con dicho objetivo, y se están haciendo pruebas de sistemas de energía del oleaje y mareal [figura 2.16]:

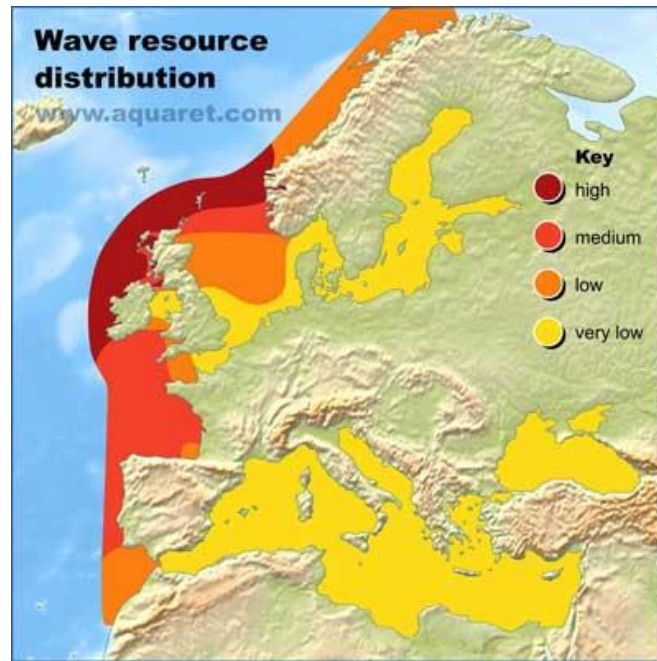


Figura 2.15. Potencial energético del oleaje costero en Europa (Fuente: [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com))

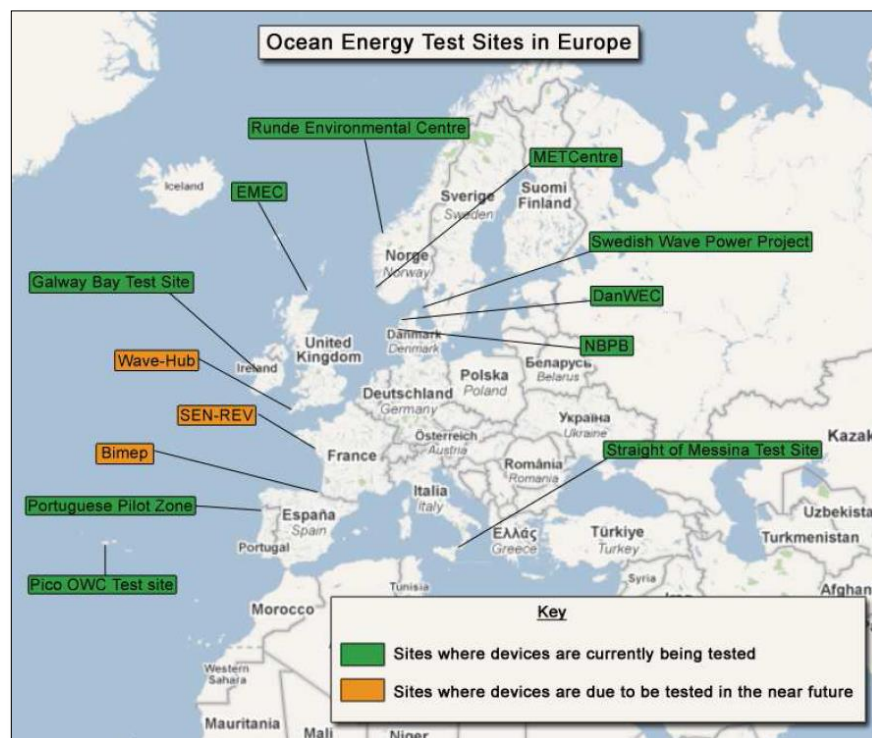


Figura 2.16. Lugares de las pruebas para sistemas de energía del oleaje y la marea en Europa (Fuente: [41])

Inicialmente se planteó examinar el potencial energético del oleaje en el Golfo de Cádiz, pero como se ve en la imagen anterior [figura 2.15], es demasiado bajo para dedicar un estudio exhaustivo. La altura de ola significativa oscilaba entre 0,5 y 1,5 metros en la gran mayoría de los datos consultados de las boyas costeras, de modo que la potencia media anual resultaba ser de 2,5 kW/m aproximadamente.

Finalmente se decidió optar por la costa marroquí. Por ello, los estudios posiblemente de mayor interés, por proximidad, son los realizados en las islas de Madeira y las de Canarias, y en menor medida en las de las Azores. Como se ha indicado anteriormente, existen dos estudios en el archipiélago de Madeira, otro en el de las Azores y al menos siete en el de Canarias.

Al examinar estos estudios se observa que la energía del oleaje de los archipiélagos portugueses, al encontrarse alejados de la costa, es bastante superior al de las Islas Canarias al encontrarse más cerca de la zona de generación de olas (durante el avance, las olas van perdiendo energía). En el caso de las islas Azores [28], las potencias medias de los puntos analizados están entre las mayores que pueden lograrse en el hemisferio norte. Los resultados indican que se alcanzan hasta los 78 kW/m en el punto de mayor potencia. Al haber comparado varios resultados de diversos estudios, resulta que en invierno los valores acostumbra a ser ligeramente inferiores al doble de la media anual. Asimismo, en las islas de Madeira [27] los valores que se muestran pertenecen a un período otoñal y dos invernales. Dichos valores adquieren su valor máximo en los 65,4 kW/m. A partir de estos datos, al igual que en las Azores, se deduce que la potencia media anual será mayor que la de las Canarias. Por ejemplo, en el estudio de las costas de Lanzarote [31], una de las islas Canarias, se obtienen las potencias medias más altas, y en el período invernal se alcanzan como máximo los 55 kW/m. Por lo tanto, los estudios de mayor interés para el análisis del oleaje de la costa marroquí son los del archipiélago español, al estar lo suficientemente próximo para tener unas características similares a las de la zona de estudio.



Figura 2.17. Mapa de las Islas Canarias (Fuente: [www.paddleinspain.com](http://www.paddleinspain.com))

En el estudio de la isla de Tenerife [33] se han obtenido unas potencias medias anuales alrededor de los 25 kW/m en los puntos más septentrionales de la isla, y en concreto de hasta 25,72 kW/m en el punto más al noreste. Esto se debe a que es el punto menos protegido por la isla de La Palma, ya que la dirección predominante del oleaje en esta parte del océano es la noroeste. También se ha realizado un análisis sobre cómo afecta la explotación del oleaje a los parámetros de las olas en la costa de la misma isla en otro estudio [34], donde se concluye que el impacto es significativo y se debe de tener en cuenta a la hora de escoger el convertidor de energía a instalar.

Unos resultados similares a los de la isla de Tenerife son los que aparecen en un estudio realizado en Fuerteventura [35]. La potencia media anual de la zona oeste de la isla es superior a los 23 kW/m, y en el punto más al norte de esta serie de puntos alcanza los 25,61 kW/m concretamente.

La isla de Gran Canaria, al encontrarse al abrigo de la isla de Tenerife, cuenta con una potencia media anual menor en su costa norte [36]. El máximo valor que se obtiene en el estudio de esta zona de la isla es de 15,15 kW/m.

En la isla de El Hierro se ha hecho otro estudio [30] en el que se analiza la energía del oleaje nuevamente. En este caso, el punto con mayor potencia es el situado en el noroeste al no recibir el amparo de ninguna otra isla del archipiélago. Se alcanza una potencia media anual de 26,52 kW/m. En los puntos colindantes la potencia supera los 23 kW/m.

La isla que se encuentra más al noroeste del archipiélago, la isla de La Palma, también ha sido motivo de estudio [32]. En este caso, la ausencia de barrera alguna que disminuya la potencia de las olas en esta isla hace que se alcancen valores superiores a 27 kW/m en los puntos del noroeste, y en concreto de 28,46 kW/m en uno de ellos.

Por este mismo motivo, en la isla de Lanzarote, la que se encuentra más al noreste del archipiélago, también se han observado unas potencias ligeramente superiores al resto de islas [31]. En las costas oeste y norte se llegan a obtener unos valores de entre 27 y 31 kW/m, y en uno de sus puntos se alcanzan los 31,5 kW/m.

Si se observan los resultados de los estudios en el archipiélago canario, se puede pronosticar en líneas generales una guía de los valores que se obtendrán en la costa marroquí. Tal como se puede comprobar en el apartado de los resultados, en la zona en la que las islas protegen la costa, los valores de la potencia media anual serán bajos. A medida que se vaya superando esta barrera física, estos valores irán aumentando. Esto es debido a que, como ya se ha indicado, la dirección predominante del oleaje es la noroeste. Más hacia el norte se alcanzará el valor máximo, similar a los valores máximos de las Islas Canarias, y a continuación se registrará un descenso de la potencia hasta que alcance de nuevo valores mínimos en las proximidades de la Península Ibérica, ya que ésta actuará de barrera del oleaje, como se muestra en la última imagen [figura 2.17].

Los valores que se han obtenido a la mayoría de las islas del archipiélago canario se consideran suficientes, generalmente, para considerar la opción de la instalación de un WEC. Para el presente estudio, se esperan obtener unos resultados similares, lo que supondría que

el aprovechamiento de la energía de las olas de la costa marroquí fuese factible. De hecho, en la actualidad ya está operativo un sistema de generación eléctrico marino que aprovecha la energía de las olas del mar a una milla marina de la costa noroeste de la isla de Gran Canaria, a pesar de ser una de las islas con menor potencia de oleaje. Se trata del Proyecto UNDIGEN-W200, el paso previo a una planta piloto de generación de energía de las olas, según la plataforma PLOCAN. Asimismo, se están desarrollando otros proyectos con el mismo fin, como por ejemplo en Tenerife y Lanzarote el prototipo “Robusto” de la empresa Langlee Wave Power.

Las Islas Canarias son pioneras en cuanto a aprovechamiento de la energía del oleaje se refiere. Como se verá más adelante, los valores energéticos que se obtienen en la costa de Marruecos son similares. Esto permite pensar que en un futuro este tipo de aprovechamiento energético puede ser una realidad en este país, y que un estudio del oleaje de su costa es indispensable para alcanzar este futuro deseado.

### 2.3. Energías renovables en Marruecos

Actualmente la producción energética en Marruecos tiene su origen mayoritariamente en la energía térmica. Según datos del año 2012, únicamente el 10% de la producción nace a partir de fuentes renovables, como la hidráulica o la eólica. Esto se puede observar en la primera imagen [figura 2.18], donde se ve que sólo el 6,18% de la producción proviene de la energía hidráulica y el 2,76% de la eólica. Todo esto, sumado a que el consumo de energía va en un aumento progresivo, a la escasez de combustibles fósiles y a otras muchas cuestiones medioambientales, hace que la existencia de una necesidad de un cambio en el panorama energético sea cada vez menos cuestionable.

La producción de energía en Marruecos en el 2012 fue de 26.495,2 GWh, mientras que la demanda nacional de electricidad en ese mismo año fue de 31.055 GWh. Cabe destacar que el sector energético del país se caracteriza por una gran dependencia del exterior, en concreto del 97% aproximadamente para fuentes de energías primarias y del 15% para energía eléctrica. En cuanto a la potencia total instalada, en el 2012 era de 6.692 MW, de los cuales 4.667 provienen de fuentes térmicas, 1.770 de hidráulicas y 225 de eólicas.

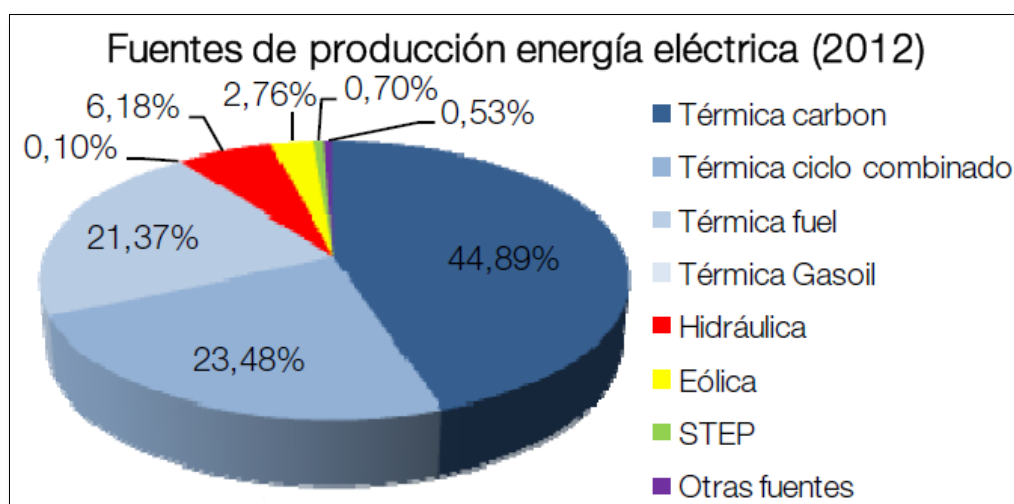


Figura 2.18. Fuentes de producción de energía eléctrica en Marruecos en el 2012 (Fuente: [42])

La introducción de nuevas energías renovables, como la marina, puede ser una posibilidad muy interesante de cara al futuro de Marruecos. La explotación de este tipo de recursos no fungibles puede abrir las puertas a nuevos tiempos en lo que a energía se refiere.

Al igual que en la Unión Europea, las autoridades marroquíes diseñaron en 2010 un plan para promover las energías renovables del país debido a la gran dependencia del exterior. La intención es que para el año 2020 las fuentes de este tipo aporten el 42% del total de la potencia instalada, lo que sería un gran avance comparado con el 30% del 2012 [figura 2.19, tabla 2.5]. Este 42% se pretende dividir en partes iguales entre la energía solar, la eólica y la hidráulica, con un aporte del 14% de cada una. Por ello, se han realizado diversos estudios para estudiar el potencial solar y eólico en Marruecos.



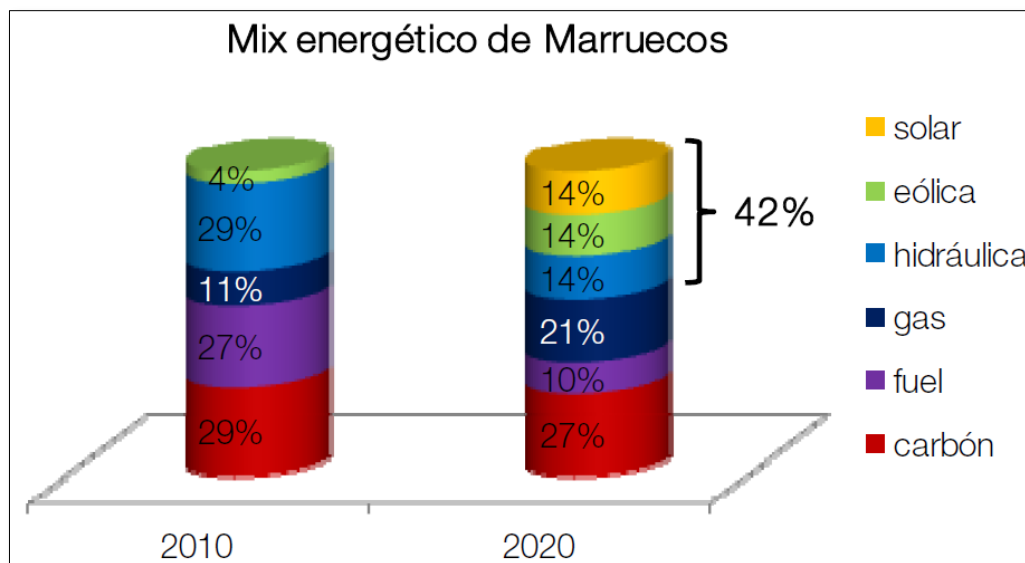


Figura 2.19. Potencia total instalada en Marruecos en el 2010 y la estimada para el 2020  
(Fuente: [42])

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<b>Térmica</b>	3.189	3.189	3.069	3.449	3.449	3.449	3.449	4.165	4.352	4.352	4.667
<b>Hidráulica</b>	1.167	1.265	1.498	1.729	1.729	1.729	1.729	1.749	1.770,1	1.770,1	1.770,1
<b>Eólica</b>	54	54	54	54	54	114	114	221	221	254,9	254,9
<b>Total</b>	<b>4.410</b>	<b>4.508</b>	<b>4.621</b>	<b>5.232</b>	<b>5.232</b>	<b>5.292</b>	<b>5.292</b>	<b>6.135</b>	<b>6.343,1</b>	<b>6.377</b>	<b>6.692</b>

Tabla 2.5. Evolución de la potencia total instalada en Marruecos en el período 2002-2012  
(Fuente: [42])

La demanda nacional de electricidad está en continuo aumento. En el año 2012 fue de 31.055 GWh, lo que significó un aumento del 8% respecto al año anterior. Se espera que el crecimiento en los próximos años se mantenga en ese porcentaje, lo que significa que para el año 2020 la demanda estimada será de 52.000 GWh y para el 2030 será de 95.000 GWh.

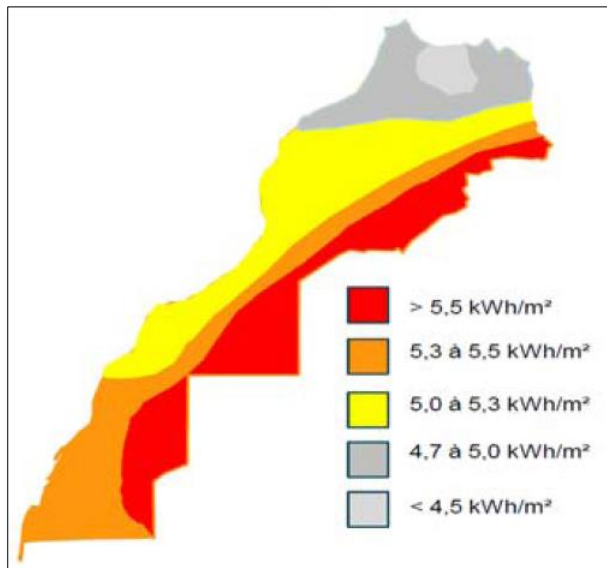
Varios factores son la causa de este auge. Uno de ellos es el aumento de población, que para el año 2050 se estima que será de 41,3 millones de habitantes. Actualmente Marruecos cuenta con 33 millones de habitantes. Otro factor es la urbanización del país, ya que este aumento de población se verá reflejado en las zonas urbanas. En cambio, la población rural disminuirá levemente con el paso de los años. Un tercer factor es el incremento de la tasa de electrificación rural, que significará el abastecimiento eléctrico de casi dos millones de hogares.

Diversos factores completan la lista, como son la demanda energética del sector industrial, el sector turístico, redes de infraestructuras como la ferroviaria, etc.

Por último, Marruecos ha puesto en funcionamiento una estrategia que pretende mejorar la eficiencia y el ahorro energético. El motivo de ello, principalmente, es el aumento del precio del petróleo y los aspectos medioambientales. Para lograrlo, el país apostará por las energías renovables, tal como refleja el plan para promoverlas que se ha mencionado anteriormente.

### 2.3.1. Energía solar

Varios estudios afirman que Marruecos tiene un potencial solar suficiente para ser explotado, ya que el 30% del territorio recibe anualmente más de 2.000 kWh/m<sup>2</sup> [figura 2.20]. El Plan Solar Marroquí ha marcado como objetivo la instalación de cinco plantas solares que generarían una potencia total de 2.000 MW y cuya producción energética anual estimada alcanzaría los 4.500 GWh/año [figura 2.21]. La inversión de este plan ascendería a los 9.500 millones de dólares.



El principal problema de la instalación de parques solares es el impacto visual y espacial. La ventaja con la que cuenta Marruecos es que las zonas potencialmente aptas para la explotación de esta fuente renovable tienen una densidad de población bajísima, como ocurre en el desierto del Sahara y en la meseta del Atlas. Ambas suman un área de 400.000 km<sup>2</sup>. Estas dos zonas del territorio marroquí reciben una energía solar en total de hasta dos veces la que se recibe en Europa.

Figura 2.20. Mapa del potencial solar de Marruecos (Fuente: [42])

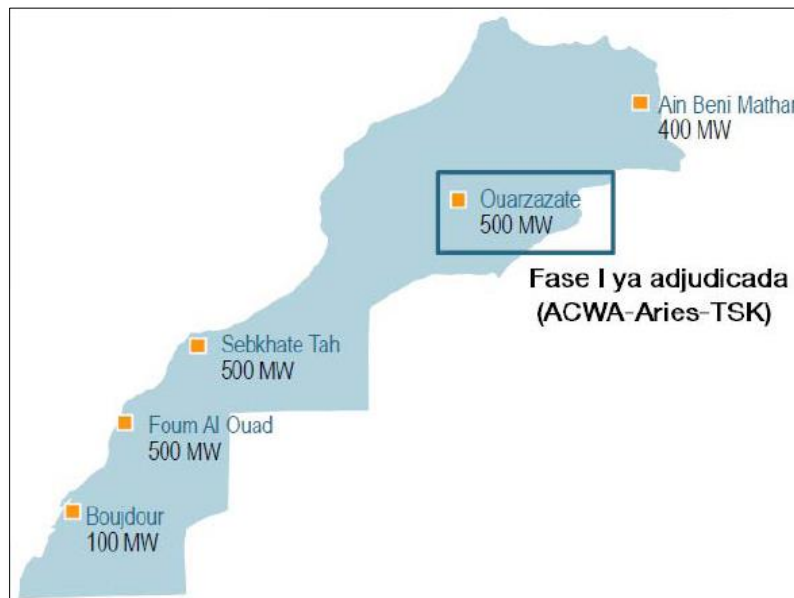
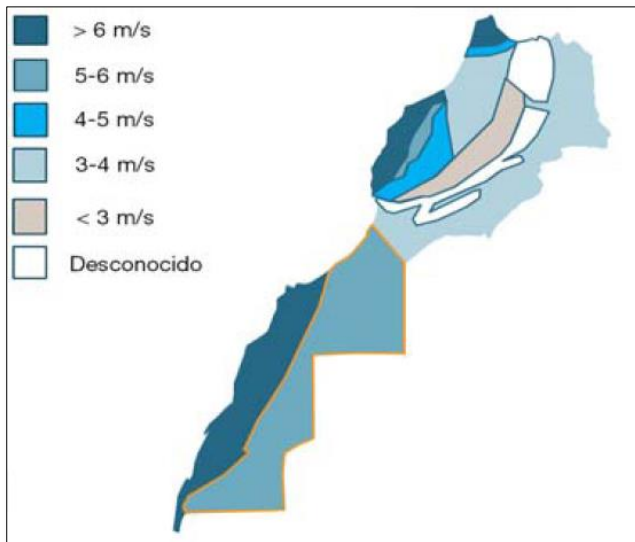


Figura 2.21. Mapa de las cinco plantas solares proyectadas para el año 2020 (Fuente: [42])

### 2.3.2. Energía eólica

Marruecos también cuenta con un Plan Eólico Integrado, con un aumento de la potencia instalada de 1.000 MW. Actualmente cuenta con unos 280 MW instalados y 720 MW en construcción [figura 2.23], de modo que el aumento del plan significaría una potencia total de origen eólico de 2.000 MW, la misma que la solar anteriormente comentada. En la actualidad existen cinco parques eólicos en funcionamiento, y el propósito es crear otros tantos para así generar la energía deseada. La inversión del programa ascendería a 3.500 millones de dólares.



La zona predominante de viento es la costa atlántica [figura 2.22], al contrario que en el caso de la energía solar, en el que la mejor zona de explotación se encontraba en el interior del país.

La costa marroquí cuenta con zonas rocosas en las que posiblemente el impacto de la instalación de parques eólicos sería bajo.

Figura 2.22. Mapa de velocidades del viento de Marruecos (Fuente: [42])

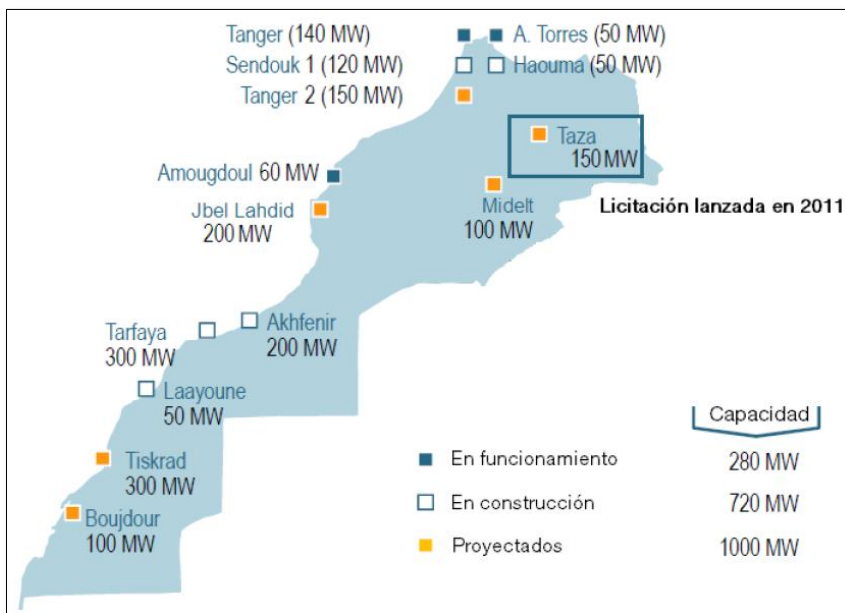


Figura 2.23. Parques eólicos en funcionamiento, construcción y proyecto en Marruecos (Fuente: [42])

### **2.3.3. Otras fuentes de energía**

Aparte de la energía solar y la eólica, existen otros tipos de energía renovable a considerar en Marruecos. La biomasa, tal como se entiende en la actualidad, no está implantada en el país, pero la nueva Ley de Energías Renovables de Marruecos la incluye como energía renovable, así que se espera que próximamente se desarrolle.

En cuanto a lo referente a la hidráulica, dicha ley acabó considerando a la “pequeña hidráulica” como renovable. En el marco de esta ley entran las instalaciones hidroeléctricas con potencias inferiores a los 12 MW, de modo que varias centrales hidráulicas de gran potencia quedarían excluidas. En el 2001 se realizó un estudio para conocer los sitios que se podrían explotar para la instalación de microcentrales hidráulicas. El resultado fue que existen 200 emplazamientos que cumplen con las expectativas, y la potencia a instalar rondaría entre los 15 y los 100 kW en cada punto. Este tipo de instalaciones serían apropiadas para regiones que se encontrasen apartadas o aisladas en zonas montañosas.

Por otra parte, la ausencia de regulación del gas en Marruecos provoca que su desarrollo sufra un retraso, a pesar que en el plan para el año 2020 su peso en el mix energético tenga que aumentar hasta el 21% del total.

En medio de este panorama energético aparece la opción de la energía con origen marítimo. Existen varias formas de aprovecharla: a través de las olas, las corrientes y las mareas. Este estudio se centra en la procedente de las primeras. La costa atlántica marroquí ofrece muchas posibilidades, y para cumplir con las expectativas que propone el plan de energías renovables del país, que consiste en aumentar el aporte energético con origen renovable hasta el 42%, se deberán contemplar todas las posibilidades viables. Como se verá más adelante, los resultados que arrojan los datos estudiados son positivos. Explotar la costa marroquí es factible energéticamente, recomendado para garantizar un futuro más sostenible y limpio, e incluso necesario desde el punto de vista medioambiental.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1. Características de la costa atlántica marroquí

Marruecos, país soberano situado en el Magreb, es el territorio más noroccidental de África. Comparte frontera con Argelia en el este y limita con Mauritania y la disputada región de Sahara Occidental en el sur. En la parte oeste se abre al Océano Atlántico y en la norte al Mar Mediterráneo [figura 3.1].



Figura 3.1. Mapa político de Marruecos (Fuente: [www.onhabitat.com](http://www.onhabitat.com) [imagen pequeña], [commons.wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org) [imagen grande])

El país se puede dividir en tres regiones topográficas diferenciadas: la primera se trataría de un área abierta en el noroeste, encerrada por el complejo montañoso del Rif. La segunda estaría formada por las montañas y mesetas de la zona oriental y meridional, donde se encuentran las montañas del Atlas. La tercera comprende las fértiles llanuras costeras del oeste, que separan las cadenas montañosas de la costa occidental de brisas frescas y largas playas de arena. Dicha costa es la de interés para el estudio.

La línea de la costa tiene una longitud aproximada de 2.903 km, repartidos en dos secciones:

- En el Mar Mediterráneo, entre Saïdia (en la frontera con Argelia) y el cabo Espartel (en Tánger), la costa recorre 582 km.
- En el Océano Atlántico, entre el cabo Espartel y el cabo Blanco (en La Güera, Sahara Occidental, en la frontera con Mauritania), la costa recorre 2321 km.

Esta última, situada en el litoral atlántico, comprende concretamente la zona de estudio. Por lo general, sus costas son bajas, de arena fina en sus largas playas y con escaso relieve. También tiene calas tranquilas, incluidas las de los puertos de Rabat y Casablanca. Sin embargo, a menudo cuenta con zonas rocosas. Sus accidentes más importantes, de norte a sur, son: el cabo Espartel, el cabo Beddouza, el cabo Rhir, la bahía de Agadir, el cabo Juby, el cabo Bojador y el cabo Blanco.

### **3.2. Características del oleaje atlántico**

El viento nace a partir de la circulación de masas de aire, que son desplazadas por culpa de los gradientes de presión. En el círculo ecuatorial las presiones son bajas debido a la ascensión del aire caliente, lo que provoca que las masas de aire de las zonas de altas presiones se desplacen hacia este círculo. Estas zonas de bajas presiones se encuentran por lo general aproximadamente entre los 30 y los 40° de latitud tanto en el hemisferio norte como en el hemisferio sur, aunque en el primero se ven modificadas por la presencia de grandes zonas terrestres y las estaciones del año. Otra región de bajas presiones aparece alrededor de los 60° de latitud también en ambos hemisferios, a causa del calentamiento de las masas de aire procedentes del Ecuador. Por último, en los polos también aparecen zonas de alta presión. Toda esta distribución de presiones provoca que existan varias vertientes de circulación desde las zonas de altas presiones hacia las zonas de bajas presiones.

Otro factor que influye en los desplazamientos de aire es la rotación de la Tierra. El denominado efecto Coriolis hace que todo cuerpo o fluido que se desplace sufra una desviación a causa de dicha rotación. En el hemisferio norte, esta desviación es hacia la derecha, mientras que en el hemisferio sur, hacia la izquierda.

Estos dos principios definen las direcciones predominantes de las masas de aire alrededor del globo. Los más destacables son los vientos alisios y los contraalisios. Los primeros viajan hacia el Ecuador con dirección suroeste en el hemisferio norte y con dirección noroeste en el hemisferio sur. Los segundos, en dirección opuesta [figura 3.2].

Cabe decir que este mapa de vientos se asemeja al mapa de corrientes oceánicas superficiales, es decir, tiene unos patrones direccionales parecidos, ya que el efecto Coriolis también está presente, además de presentar una similitud en la distribución de los gradientes de temperaturas en sus respectivos fluidos.

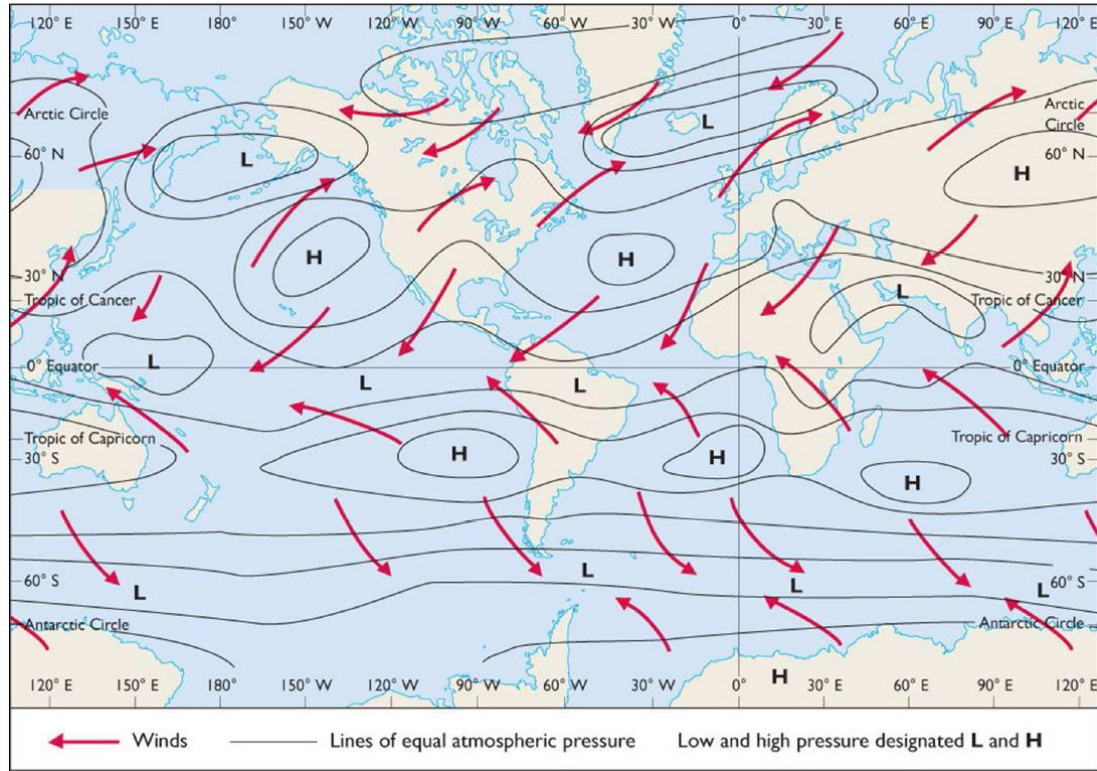


Figura 3.2. Mapa de presiones atmosféricas generales y direcciones predominantes del viento (Fuente: [43])

Las olas surgen a causa de la fricción que ejerce el viento sobre su superficie. Por consiguiente, la dirección del viento determina principalmente la dirección del oleaje. Del mismo modo, las olas siguen unos patrones de desplazamiento similares a los del viento. Esto se puede observar en la imagen en la que se representa la potencia y la dirección media del oleaje [figura 3.3]. Además, en las zonas de bajas presiones el oleaje es más intenso, es decir, su potencia es mayor por la presencia de borrascas. Lo contrario sucede en las zonas de altas presiones donde aparecen los anticiclones. En la zona de bajas presiones del hemisferio sur, al no haber apenas superficie terrestre y encontrarse el *fetch* (longitud de la zona marítima donde el viento sopla sin cambios significativos en la misma dirección y sin encontrar obstáculos; a mayor *fetch*, mayor desarrollo de las olas) más grande del planeta, se dan las mayores potencias de oleaje, que llegan a superar los 120 kW/m en algunas zonas al sur del Océano Índico.

La región de más interés para el estudio es el Océano Atlántico, donde, al igual que sucede con los patrones de dirección del viento y de presión atmosférica, se pueden distinguir cinco grandes zonas con distinto régimen de oleaje. Una de ellas se encuentra en el norte del océano, al sur de Islandia y a una latitud aproximada de 50°N, con una intensidad elevada y una dirección media que apunta hacia Europa y se desvía hacia la derecha en la parte más

meridional y hacia la izquierda en la más septentrional, hacia el Polo Norte. La segunda, la más amplia de todas las zonas, abarca la parte más próxima al Ecuador, desde los 30°N hasta los 30°S, donde se encuentran unas potencias relativamente bajas y la dirección del oleaje gira hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. La tercera está ubicada en el sur, en una franja situada alrededor de la latitud 50°S, con la mayor intensidad de todo el océano a causa de su gran *fetch*, como se ha mencionado anteriormente. La cuarta y la quinta zona se encuentran alrededor de los polos.

Si se analiza más concretamente la zona de estudio, la costa marroquí, se puede observar que el estado medio de las olas se encuentra entre la primera y la segunda zona de régimen de oleaje. Las olas que llegan a la costa de Marruecos tienen su origen en la región norte próxima a las Islas Azores. En ella, por la acción de vientos de gran intensidad y duración, se forman enormes olas piramidales que sacuden el agua y propagan la ondulación resultante a grandes distancias y a una velocidad considerable. Se ha calculado que una ola inicial de 150 m de longitud tarda 30 h en recorrer la distancia entre las Azores y Marruecos.

Estas olas sufren una desviación hacia la derecha en su trayecto por el océano a causa del ya comentado efecto Coriolis y llegan a la costa marroquí de forma aproximadamente perpendicular a ella, como se observa en la imagen [figura 3.3]. La potencia de este oleaje se ve reducida a medida que avanza hacia el sureste. En su origen puede llegar a alcanzar 80 kW/m de media, pero al llegar a la costa, su potencia se reduce hasta los 20 o los 30 kW/m.

A partir de estos datos se puede estimar cuáles serán los resultados que se obtendrán a lo largo de la costa de Marruecos. En la zona norte, el oleaje se verá disminuido por el amparo que ofrece el vértice suroeste de la península ibérica. En la zona sur ocurrirá lo mismo, pero esta vez la barrera la formarán las Islas Canarias. En la zona intermedia es donde aparecerán las mayores potencias medias de oleaje, que podrían llegar, como se ha indicado, a los 30 kW/m. Además, la dirección predominante del oleaje será la norte o noroeste.

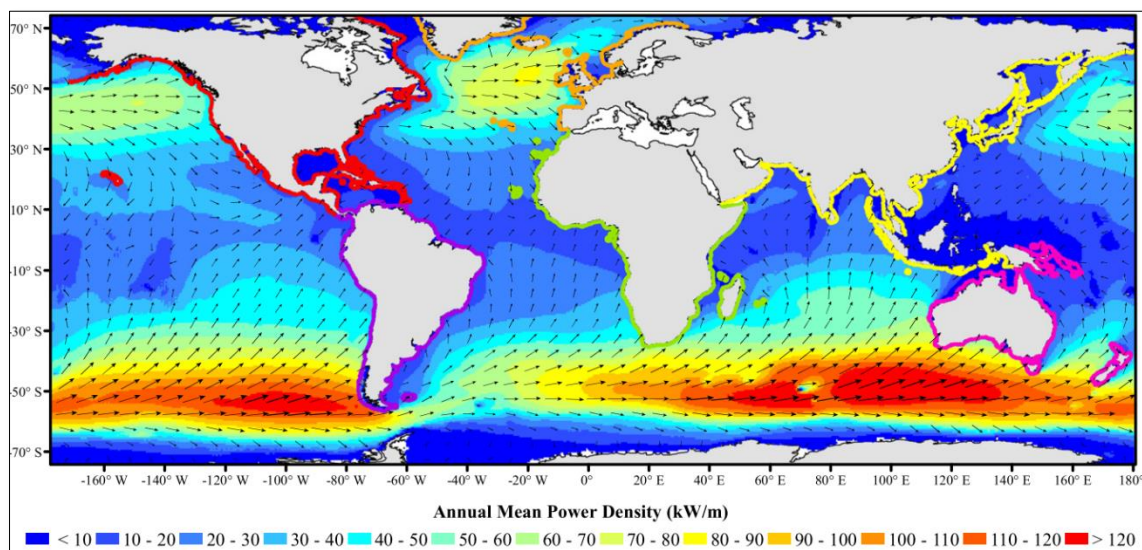


Figura 3.3. Potencia media del oleaje (kW/m) y dirección media ( → ) en los océanos (Fuente: [44])



### 3.3. Zona de estudio

La zona de estudio comprende el litoral atlántico de Marruecos. Los datos que se han utilizado para realizar el trabajo surgen de unas series temporales de parámetros atmosféricos y oceanográficos que se han modelado numéricamente, conocidos como puntos SIMAR-44. En el siguiente capítulo se explica con mayor detalle.

El conjunto de datos empleados comprende la serie de puntos SIMAR-44 con los siguientes códigos (de norte a sur) y sus respectivas coordenadas:

Punto	Nomenclatura	Latitud	Longitud
1	1056043	35.750° N	6.000° W
2	1055042	35.500° N	6.250° W
3	1054040	35.000° N	6.500° W
4	1052038	34.500° N	7.000° W
5	1050036	34.000° N	7.500° W
6	1048036	34.000° N	8.000° W
7	1046034	33.500° N	8.500° W
8	1044032	33.000° N	9.000° W
9	1042030	32.500° N	9.500° W
10	1040028	32.000° N	10.000° W
11	1040026	31.500° N	10.000° W
12	1040024	31.000° N	10.000° W
13	1040022	30.500° N	10.000° W
14	1040020	30.000° N	10.000° W
15	1038018	29.500° N	10.500° W
16	1036016	29.000° N	11.000° W
17	1034014	28.500° N	11.500° W
18	1032014	28.500° N	12.000° W
19	1030014	28.500° N	12.500° W
20	1028012	28.000° N	13.000° W
21	1026012	28.000° N	13.500° W
22	1026010	27.500° N	13.500° W
23	1024008	27.000° N	14.000° W

Tabla 3.1. Nomenclatura y coordenadas de los puntos de estudio (Fuente: [www.puertos.es](http://www.puertos.es))

A continuación se muestra un mapa con la localización de dichos puntos en la costa atlántica marroquí [figura 3.4]:

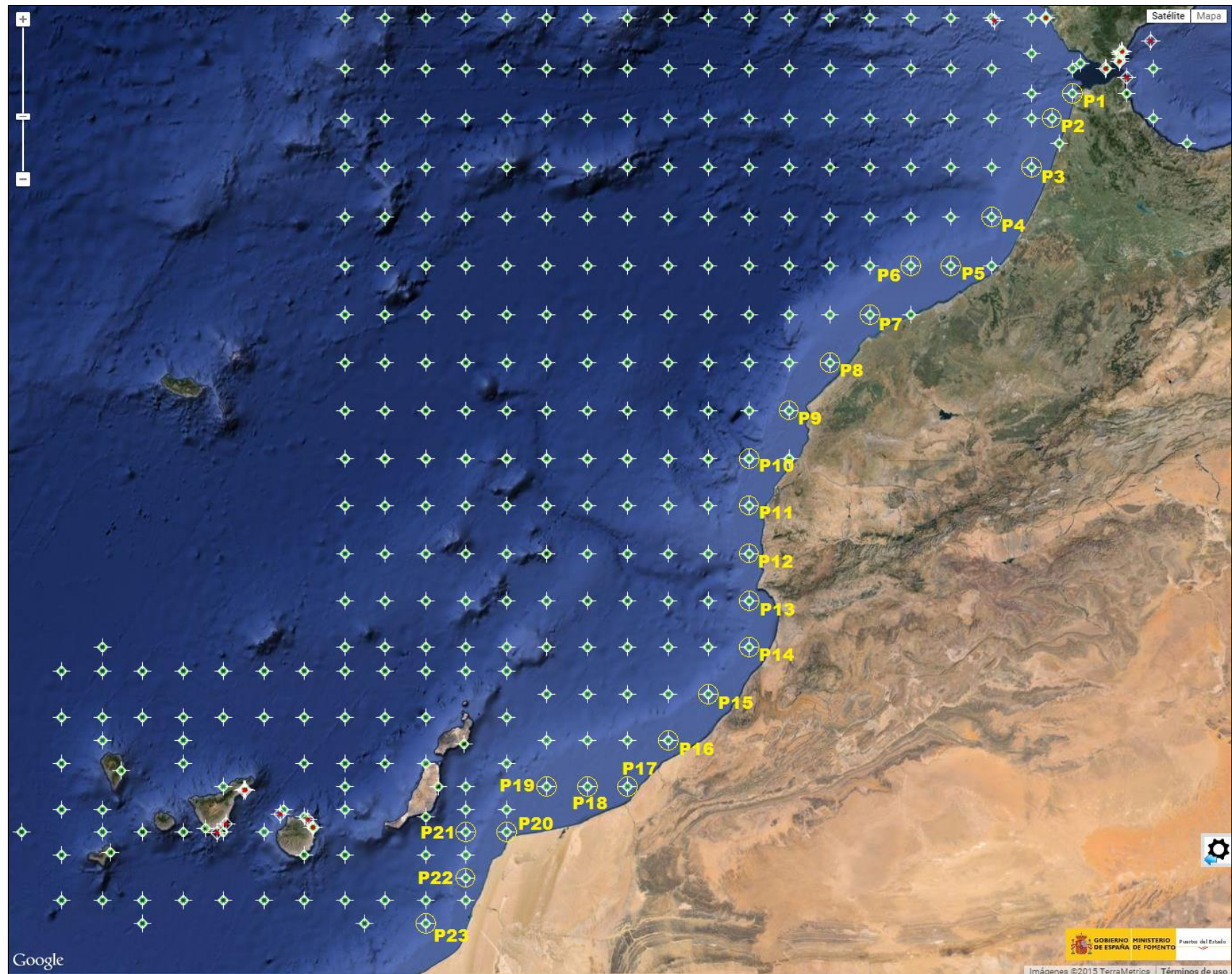


Figura 3.4. Mapa de la costa marroquí con la situación de los puntos SIMAR-44 utilizados en el estudio (Fuente: imagen modificada de [www.puertos.es](http://www.puertos.es))

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Datos utilizados

Para el desarrollo del estudio ha sido necesario consultar registros del oleaje de la costa marroquí. Para ello se han solicitado a Puertos del Estado los datos de los puntos de interés, los cuales se han indicado anteriormente [capítulo 3.3]. A pesar de ser una institución española, cuenta con un gran número de puntos en la zona del océano Atlántico que comprende las Islas Canarias y la península ibérica. Los que se han escogido han sido los más cercanos al litoral marroquí que se encontraban en aguas profundas.

A continuación se explica la procedencia y la obtención del conjunto de datos, así como datos complementarios (procedencia de los datos sobre el viento, datos y malla del mar Mediterráneo, etc.):

El conjunto de datos SIMAR-44 está formado por series temporales de parámetros atmosféricos y oceanográficos procedentes de modelado numérico. Son, por tanto, datos simulados por ordenador y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

El conjunto SIMAR-44 se constituye a partir de modelado numérico de alta resolución de atmósfera, nivel del mar y oleaje que cubre todo el entorno litoral español. La simulación de atmósfera y nivel del mar en todo el dominio de trabajo, así como la simulación de oleaje en la cuenca mediterránea han sido realizadas por Puertos del Estado en el marco del Proyecto Europeo HIPOCAS. La simulación de oleaje en el dominio Atlántico, el de interés para el estudio, ha sido realizada por Puertos del Estado de modo independiente.

Seguidamente se da una breve descripción del modo en que se ha generado cada uno de los agentes simulados.

#### Viento

Los datos de viento de este conjunto se han obtenido mediante el modelo atmosférico regional REMO, forzado por datos del reanálisis global NCEP. Dicho reanálisis asimila datos instrumentales y de satélite. El modelo REMO se ha integrado utilizando una malla de 30' de longitud x 30' de latitud (aproximadamente 50Km x 50Km) con un paso de tiempo de 5 minutos. Los datos de viento facilitados son promedios horarios a 10 metros de altura sobre el nivel del mar.

Debido a la resolución de la malla utilizada para integrar el modelo REMO no es posible reproducir el efecto de accidentes orográficos de extensión inferior a 50Km. Tampoco queda modelada la influencia en el viento de los procesos de convección de escala local. No obstante, el modelo reproduce correctamente los vientos regionales inducidos por la topografía como el Cierzo, Tramontana, Mistral, etc. De modo general es más fiable la reproducción de situaciones con vientos procedentes de mar.

### Componente Atmosférica de Nivel del Mar

La variación de nivel del mar debida a la acción de la presión y el viento, se conoce como componente atmosférica de nivel del mar o residuo meteorológico. En este conjunto de datos dicha variación ha sido simulada mediante el modelo de circulación HAMSOM. La integración se ha realizado en modo barotrópico sobre una malla de 15' latitud x 10' longitud con datos de atmósfera procedentes del modelo REMO.

Los datos de residuo meteorológico sólo describen la variación de nivel debida a la acción atmosférica. Para su uso práctico es necesario sumar la contribución de marea astronómica. Cuando no se conozca la onda de marea astronómica y se necesite tener una valoración aproximada de la magnitud de situaciones de riesgo se deberá sumar a la serie de residuos una estimación de la pleamar viva para la zona de estudio.

### Oleaje

Para generar los campos de oleaje se ha utilizado en modelo numérico WAM. Dicha aplicación es un modelo espectral de tercera generación que resuelve la ecuación de balance de energía sin establecer ninguna hipótesis a priori sobre la forma del espectro de oleaje. Los datos se han generado con una cadencia horaria. Se ha realizado descomposición de mar de viento y mar de fondo. Con el fin de describir situaciones con mares de fondo cruzados, se ha considerado la posibilidad de dos contribuciones de mar de fondo.

Para el área mediterránea se ha utilizado una malla de espaciamiento variable con una resolución de 15' de latitud x 15' de longitud para el borde Este de la malla y de 7.5' de latitud x 7.5' de longitud (aproximadamente 12.5Km x 12.5Km) para el resto del área modelada.

Por otro lado, para el área atlántica, el área de interés, se ha utilizado una malla de espaciamiento variable que cubre todo el Atlántico Norte con una resolución de 30' latitud x 30' longitud para las zonas más alejadas de la Península Ibérica y de Canarias. Para el entorno del Golfo de Cádiz y del Archipiélago Canario se han anidado a la malla principal mallas secundarias con una resolución de 5' de longitud x 5' latitud. De modo análogo, para el Mar Cantábrico y Galicia se han utilizado mallas anidadas con una resolución de 2.5' de longitud x 2.5' de latitud.

El modelo WAM utilizado incluye efectos de refracción y asomeramiento. No obstante dada la resolución del modelo, se pueden considerar despreciables los efectos del fondo. Por tanto, para uso práctico, los datos de oleaje deben de interpretarse siempre como datos en aguas abiertas a profundidades indefinidas.

Parámetros Disponibles y su anotación:

- Nivel del Mar
  - Residuo de Nivel del Mar ( Marea Meteorológica) (Niv\_Res)
- Oleaje
  - Altura significante espectral (Hm0)
  - Periodo de pico espectral (Tp)
  - Periodo medio espectral (momentos 0 y 2) (Tm)

- Dirección Media de Procedencia del Oleaje (Dmd)
- Altura, Periodo Medio, y Dirección de Mar de Viento (Hm0\_v, Tm\_v, Dmd\_v)
- Altura, Periodo Medio, Dirección de Mar de Fondo (Hm0\_f1, Hm0\_f2, Tm\_f1, Tm\_f2, Dmd\_f1, Dmd\_f2)
- Viento
  - Velocidad media (Vv\_md)
  - Dirección medida de Procedencia del Viento (Dv\_md)

Puntos disponibles:

De toda la información generada en el proceso de modelado, se ha seleccionado una fracción considerada como representativa del clima en el entorno litoral español. Las series temporales almacenadas en el Banco de Datos cubren el periodo de 44 años, 1958-2001, con un dato cada 3 horas.

Las imágenes a continuación [figura 4.1, figura 4.2] muestran las posiciones de los nodos de malla seleccionados para su almacenamiento en el Banco de Datos para el Mediterráneo y Atlántico respectivamente. En general para cada una de estas posiciones se disponen de series de oleaje, viento y residuo atmosférico de nivel del mar.

En el proceso de modelado se generaron campos con una cadencia horaria, pero con el fin de generar conjuntos de datos de un tamaño más manejable, las series almacenadas en el Banco de Datos tienen una cadencia de un dato cada 3 horas. Con todo y con ello, el tamaño del fichero con los datos de un sólo nodo es de 12 Mb (2,3 Mb en formato comprimido).

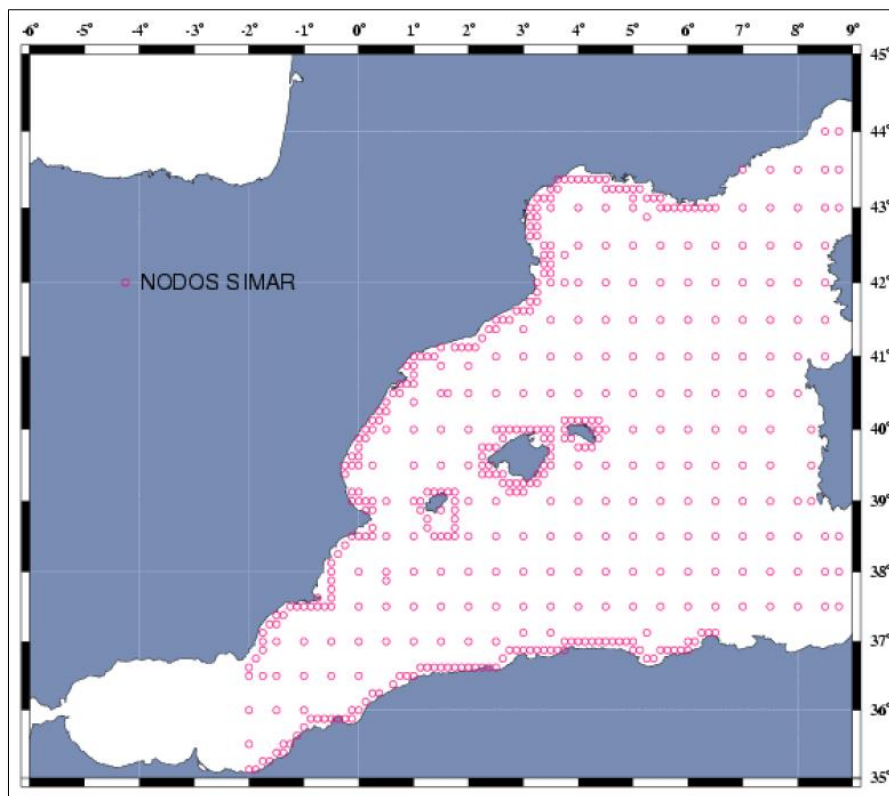


Figura 4.1. Puntos SIMAR-44 para la región mediterránea (Fuente: [www.puertos.es](http://www.puertos.es))

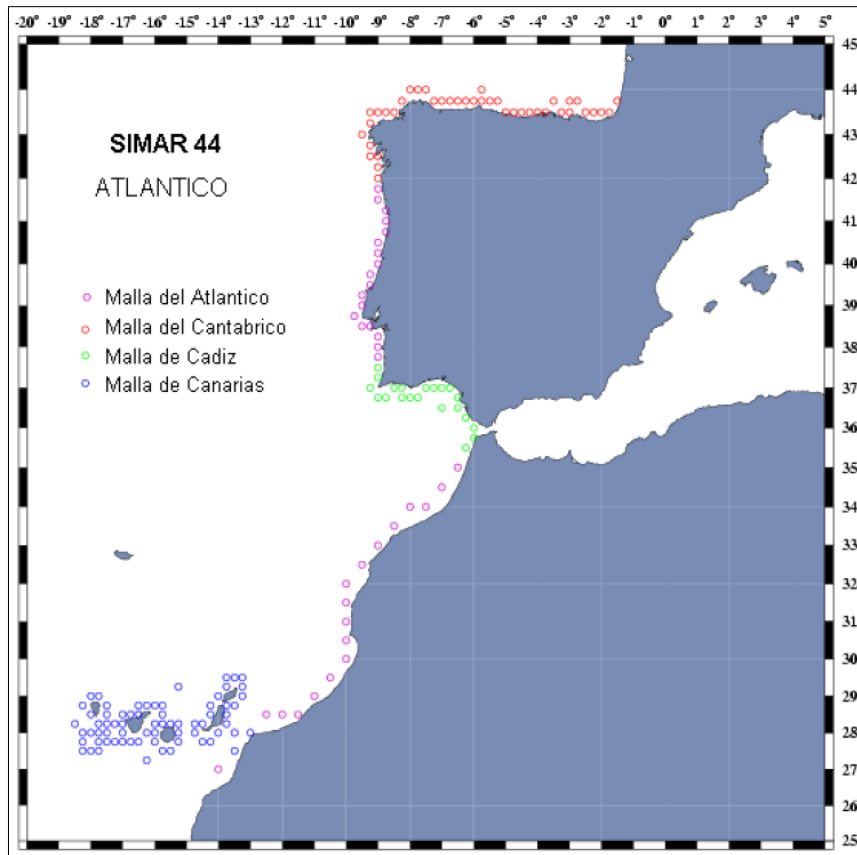


Figura 4.2. Puntos SIMAR-44 para la región atlántica (Fuente: [www.puertos.es](http://www.puertos.es))

Los datos que se solicitaron para la realización del estudio fueron los pertenecientes a la malla del Atlántico. Resultó ser un total de 23 puntos con datos oceanográficos modelados de los 44 años que comprenden el período 1958-2001, tal como se ha explicado. De cada uno se extrajo la información necesaria para poder proceder al cálculo de la potencia del oleaje y otras características del mismo. Esta información consiste básicamente en la fecha del registro (año YY, mes MM, día DD y hora HH) y tres parámetros, que son la altura de ola significativa  $H_s$  (m) ( $H_{m0}$ ), el período pico  $T_p$  (s) ( $T_p$ ) y la dirección del oleaje  $\theta$  ( $^\circ$ ) ( $D_{md}$ ).

Cada uno de los puntos está compuesto por 128.525 datos de oleaje. Cabe destacar que los registros de los 4 primeros días de enero de 1958 no constan (datos no disponibles), al igual que ocurre con los últimos datos a partir de las 15 horas del 30 de diciembre de 2001 (no se han contabilizado en el total de los datos). Resultan ser un total de 42 registros.

Para cerciorar que el modelado numérico de los puntos SIMAR es fiel a la realidad se acostumbra a comparar los datos con registros reales del oleaje recogidos por boyas cercanas a estos puntos. Lamentablemente, en la zona de estudio no se encuentra ninguna boya, pero en otras mallas sí. Esto ha permitido comprobar en otros estudios [8, 31] la fidelidad de los datos procedentes del modelado numérico, de modo que los registros utilizados para este trabajo se pueden considerar muy próximos a la realidad.

Una vez se han filtrado todos los datos y se han traspasado a la hoja de cálculo, ya se pueden comenzar a realizar los cálculos necesarios para descubrir el potencial energético del oleaje de la costa de Marruecos.

## 4.2. Análisis de la energía del oleaje

### 4.2.1. Potencia media anual

En este estudio el principal objetivo es analizar qué lugar sería el más adecuado para un futuro aprovechamiento de la energía del oleaje mediante dispositivos WEC. Para ello, el factor más determinante es la potencia media anual. Representa la media de todos los registros de potencia calculados a lo largo de la serie temporal de 44 años de la que se dispone.

Antes de todo, se ha de disponer de los datos necesarios extraídos de los registros de los puntos de análisis en la hoja de cálculo pertinente. Son necesarios, como se ha indicado en el anterior apartado, la fecha del registro, la altura de ola significativa, el período pico y la dirección del oleaje. Como se trabaja con flujos de energía (potencia del oleaje), es imprescindible que el período pico sea convertido a período energético. Este período representa el período de una ola sinusoidal con el mismo contenido energético que el estado de mar en el que se encuentra dicha ola. Tal como se explicaba con anterioridad [capítulo 2.1.2], para realizar la conversión se utiliza la siguiente expresión:

$$T_e = \alpha T_p$$

El valor del coeficiente  $\alpha$  varía de 0,86 a 1 según el espectro de Pierson-Moskowitz. Este valor depende de la forma que tenga el espectro de la ola. Cuanto más cercano esté a la unidad, la banda del espectro será más estrecha. En este límite ( $\alpha = 1$ ), el período energético sería igual que el de pico, lo que significaría que el espectro sería prácticamente una línea vertical [figura 4.3].

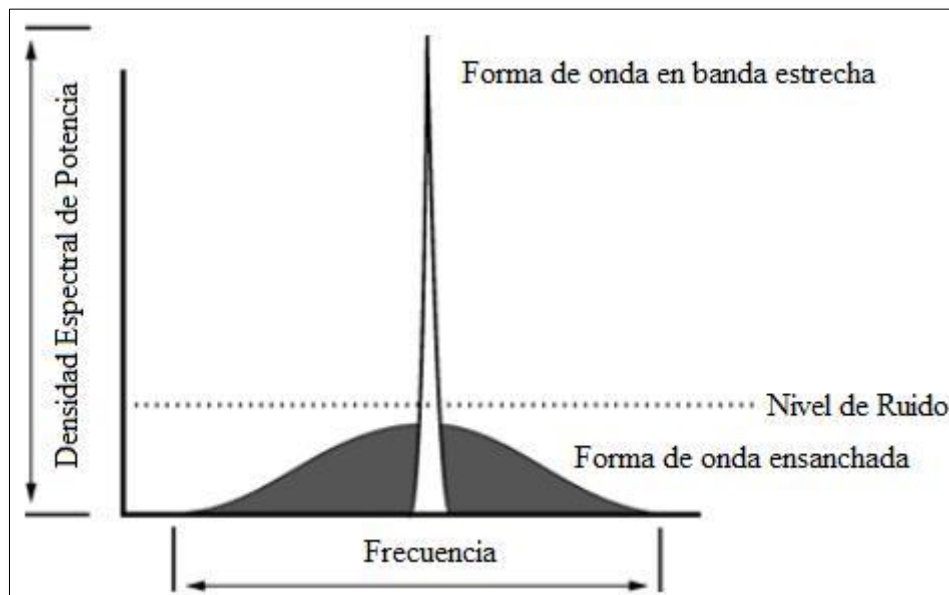


Figura 4.3. Comparación de un espectro de banda ancha con uno de banda estrecha  
(Fuente: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org))

Un espectro de banda ancha representa un oleaje tipo *sea* o mar de viento, donde las olas permanecen en el área de generación a causa del viento. Es un oleaje muy irregular con períodos pequeños, pero con una alta gama de frecuencias ( $\alpha \rightarrow 0,86$ ).

Un espectro de banda estrecha representa un oleaje tipo *swell* o mar de fondo, donde las olas ya han abandonado el área de generación. Es un oleaje más ordenado con grandes períodos, pero con una gama de frecuencias reducida ( $\alpha \rightarrow 1$ ).

Para el caso del estudio, como el tipo de oleaje predominante es de mar de fondo conjuntamente con oleaje de mar de viento al disponer de grandes *fetchs*, se ha escogido un valor para  $\alpha$  de 0,9, siendo conservador.

Una vez se dispone de los valores de la altura de ola significativa y el período energético de cada registro, ya se puede proceder al cálculo de la potencia del oleaje. Para ello se debe utilizar la fórmula detallada anteriormente [capítulo 2.1.2], utilizada para calcular dicha potencia en aguas profundas donde no afectan fenómenos como la refracción, como ocurre en las proximidades costeras:

$$\bar{P} \cong 0,491 T_e H_s^2 (kW/m)$$

Como se observa, el valor predominante es la altura de ola significativa, ya que la potencia (de ahora en adelante  $P$ ) es proporcional a su cuadrado. Esto significa que donde haya olas de mayor tamaño habrá cuadráticamente más potencia que en zonas con olas menores. Las unidades en las que se expresa la potencia es el kilovatio por metro de cresta de ola. Para obtener la potencia media anual se ha de realizar la media de los valores de la potencia de cada registro para cada punto. Expresado matemáticamente resulta de la siguiente forma:

$$P_{media\ anual} = \sum_i^n \frac{P_i}{n}$$

donde  $n$  es el número total de datos registrados, que resulta ser 128525.

En el siguiente capítulo se detallan los resultados de la potencia media anual de cada uno de los 23 puntos de estudio. No obstante, como ya se ha explicado anteriormente [capítulo 2.2, capítulo 3.2], se puede realizar una estimación a partir de las condiciones generales del oleaje en la costa de Marruecos. A grandes rasgos, el oleaje de mayor potencia se encontrará aproximadamente en la posición media de la serie de puntos analizados, ya que tanto en la zona norte como en la sur existe una barrera que disminuye la energía de las olas. Estas barreras son la punta suroeste de la península ibérica y las Islas Canarias respectivamente.

#### 4.2.2. Distribución temporal

La potencia media anual es un factor muy representativo de la energía del oleaje. Sin embargo, para realizar un análisis más exhaustivo se han de conocer otros parámetros más concretos, para así tener el conocimiento de cómo inciden las olas en la zona de estudio. A partir de las distribuciones de estos parámetros se podrá determinar más firmemente la idoneidad de la instalación de dispositivos convertidores de la energía del oleaje.



En este trabajo se han estudiado los valores de la potencia según varias distribuciones. La primera de ellas es la distribución temporal, es decir, en el tiempo. En una primera parte se han calculado, a partir de los registros, las potencias medias mensuales para cada punto. En una segunda parte se han calculado las potencias medias estacionales para cada punto.

Para la primera parte, en cualquiera de los puntos, primero se ha calculado la media de cada mes para cada uno de los 44 años y después se ha hecho la media de los 44 valores que se obtienen de cada mes en concreto. Por ejemplo, para el mes de enero:

$$P_{media\ enero} = \sum_i^n \frac{P_{media\ enero\ año\ i}}{n}$$

donde n es el número de años, en este caso 44.

A partir de los resultados que se obtienen se pueden dibujar gráficos para comprobar la evolución de la potencia a través de los meses del año.

Una vez se conocen las potencias medias mensuales se puede saber la distribución estacional del régimen de oleaje. A las cuatro estaciones, primavera, verano, otoño e invierno, se les han asignado unos determinados meses para simplificar los cálculos. Estos meses se muestran en la siguiente tabla [tabla 4.1]:

Estación	Primavera			Verano			Otoño			Invierno		
Mes	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb

Tabla 4.1. Distribución de los meses en las estaciones para el cálculo de la distribución estacional

Para calcular la potencia media de cada estación simplemente se ha hecho la media entre los tres meses correspondientes a cada período de tiempo para cada punto, de la siguiente forma (se ha cogido invierno como ejemplo):

$$P_{media\ invierno} = \frac{P_{media\ diciembre} + P_{media\ enero} + P_{media\ febrero}}{3}$$

En el siguiente capítulo se muestran los resultados de las distribuciones temporales de cada uno de los puntos analizados. A través de los resultados que arrojen los cálculos de estas potencias se podrá saber qué estaciones son las más productivas energéticamente. Sin embargo, al igual que ocurre con la potencia media anual, se pueden estimar los resultados a partir de las condiciones de la zona. El litoral marroquí se encuentra en la parte norte del océano Atlántico, es decir, la zona de estudio se encuentra en el hemisferio norte. En este hemisferio la estación que presenta un clima más extremal es el invierno, mientras que el más calmado es el verano. La primavera y el otoño ofrecen unos climas similares, y en función de la zona que se analice uno será ligeramente más severo que el otro.

### 4.2.3. Distribución direccional

Un estudio de la energía del oleaje también debe contener un análisis direccional del mismo. Su importancia reside en que para la futura instalación de un convertidor de energía del oleaje, con dependencia del tipo de modelo, suele ser necesario saber la dirección predominante del oleaje, y no únicamente el punto espacial más adecuado. En el caso del trabajo, para la instalación de ambos WEC, tanto del Pelamis como del Wave Dragon, es fundamental tener conocimiento de la distribución direccional, ya que su principio de funcionamiento se basa en la recepción de las olas. Para ello, se ha de analizar qué dirección tiene cada dato de oleaje de cada uno de los 23 puntos.

La dirección de cada registro está expresada en grados ( $^{\circ}$ ), tal como se ha explicado con anterioridad [capítulo 4.1]. Según en qué rango direccional se encuentre cada uno de estos registros, se le asignará un punto direccional determinado. Los  $360^{\circ}$  se han dividido en un total de 8 secciones, de  $45^{\circ}$  cada una, correspondientes a los cuatro puntos cardinales y los puntos que se encuentran entre éstos, tal como se muestra a continuación [tabla 4.2]. Además, esta distribución se muestra gráficamente en la siguiente imagen [figura 4.4]:

Dirección	Rango direccional ( $^{\circ}$ )
N	337,5 – 22,5
NE	22,5 – 67,5
E	67,5 – 112,5
SE	112,5 – 157,5
S	157,5 – 202,5
SW	202,5 – 247,5
W	247,5 – 292,5
NW	292,5 – 337,5

Tabla 4.2. Rango de direcciones de cada uno de los 8 puntos de dirección. N = Norte; NE = Noreste; E = Este; SE = Sureste; S = Sur; SW = Suroeste; W = Oeste; NW = Noroeste

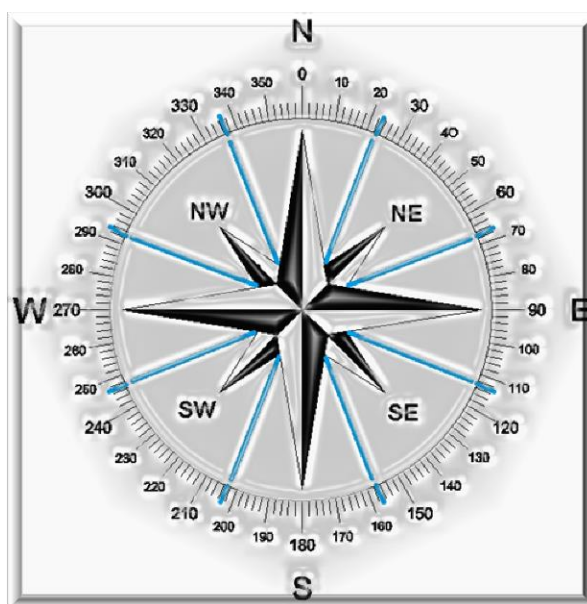


Figura 4.4. Rosa de los vientos con los rangos de las direcciones  
(Fuente: imagen modificada de recursosparaeldeporte.blogspot.com.es)

La representación de la distribución de la dirección del oleaje se realiza mediante las denominadas rosas de oleaje. Están formadas por las 8 direcciones, al igual que la rosa de los vientos, y para cada una de ellas una serie de segmentos de anchura variable representa la frecuencia de las alturas de ola en esa dirección. Dicha dirección señala la procedencia de la ola, al igual que sucede con el viento y al contrario que las corrientes, en las que señala hacia dónde va. El ancho de cada sección del segmento indica la altura de la ola, mientras que la longitud de cada sección del segmento indica la frecuencia de la misma. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de una rosa de oleaje [figura 4.5]:

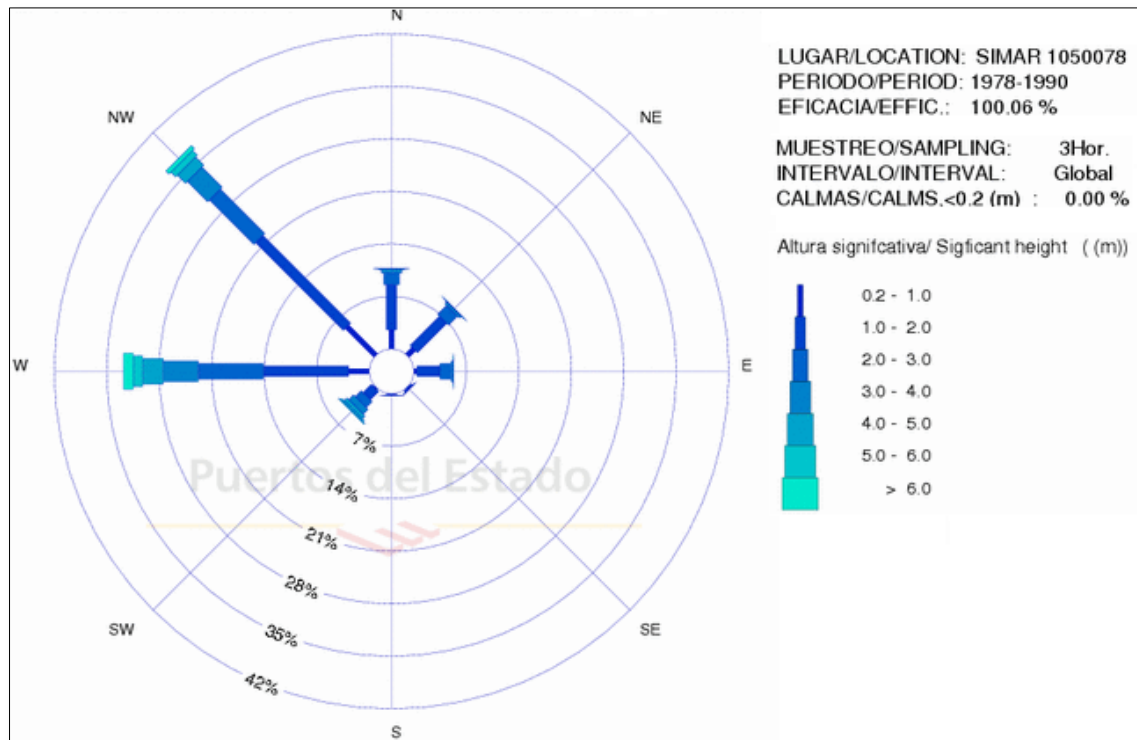


Figura 4.5. Ejemplo de una rosa de oleaje (Fuente: [www.puertos.es](http://www.puertos.es))

Al igual que ocurre con la distribución estacional, se puede realizar una estimación de cuál será la dirección o direcciones predominantes del oleaje en la costa marroquí. Según muestra una imagen de un capítulo anterior [figura 3.3] en la que se muestra la dirección media del viento en los océanos, el oleaje proveniente de la zona de las Islas Azores incidirá en el litoral de Marruecos transversalmente, es decir, con dirección predominante norte o noroeste. Esto es debido a que el viento medio tiene una dirección mayoritariamente sureste. En los resultados del siguiente capítulo se puede comprobar que estas estimaciones se cumplen como se ha pronosticado.

#### 4.2.4. Coeficientes de variabilidad

Ya se sabe que el factor más determinante a la hora de escoger la localización para la instalación de un dispositivo convertidor de energía del oleaje es la potencia media anual. Sin embargo, existen otros factores que añaden una ayuda significativa a la hora de decidir dicho emplazamiento, indicando el grado de irregularidad del oleaje. Estos factores son los coeficientes de variabilidad, que trabajan con los datos obtenidos de las diferentes distribuciones temporales calculadas y valores estadísticos.

En este estudio se han utilizado tres tipos de coeficientes o índices de variabilidad: coeficiente de variación (CV), índice de variabilidad estacional (SV) e índice de variabilidad mensual (MV).

El primero de ellos, el coeficiente de variación, da una idea de la amplitud de valores de potencia del oleaje que hay a lo largo de los registros (tiempo  $t$ ). Dicho de otra forma, indica si los valores de la potencia suelen ser cercanos a cierto valor o si presentan un amplio abanico muy variado. Para tener conocimiento de ello, este coeficiente se calcula de la siguiente forma:

$$CV = \frac{\sigma[P(t)]}{\mu[P(t)]}$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar y  $\mu$  la media.

El valor de la media evidentemente coincide con el valor de la potencia media anual. La desviación estándar, por su parte, indica el nivel de dispersión de los valores de la potencia, es decir, su proximidad o lejanía de la media. El rango de valores en el que actúa este coeficiente es  $[0, +\infty)$ , al igual que la desviación estándar.

Un resultado elevado del coeficiente de variación significaría que los valores de la potencia distarían mucho de un valor medio ( $\sigma \gg \mu$ ), lo que a su vez indicaría una gran irregularidad energética del oleaje incidente en el punto de estudio. En el caso contrario ( $\sigma \rightarrow 0$ ), supondría que el oleaje sería regular y constante.

El siguiente indicador es el índice de variabilidad estacional. Éste parámetro simplemente es una referencia para saber si la energía del oleaje sufre una variación muy grande, o no, de una estación a otra. En concreto, se han de escoger la estación más energética y la menor, y comparar sus potencias medias como se expresa a continuación:

$$SV = \frac{P_{Est1} - P_{Est4}}{P_{anual}}$$

donde  $P_{Est1}$  es la potencia media de la estación más energética, normalmente el invierno en el hemisferio norte,  $P_{Est4}$  es la potencia media de la estación menos energética, normalmente el verano en el hemisferio norte, y  $P_{anual}$  es la potencia media anual.

El rango de valores de SV es  $[0, +\infty)$ . Si SV se aproxima a la nulidad significa que la variación de potencia entre ambas estaciones es mínima. Por el contrario, si SV alcanza valores altos, la irregularidad estacional del oleaje será elevada.

Por último, el índice de variabilidad mensual sirve, al igual que con el índice de variabilidad estacional, para determinar el grado de irregularidad de la potencia del oleaje entre los meses que componen el año. Este índice se expresa de la siguiente forma:

$$MV = \frac{P_{M1} - P_{M12}}{P_{anual}}$$

donde  $P_{M1}$  es la potencia media del mes más energético y  $P_{M12}$  es la potencia media del mes menos energético.

El rango de valores vuelve a ser  $[0, +\infty)$ . La interpretación del resultado que arroje el parámetro es igual que la del índice de variabilidad estacional. Cuanto más cercano a cero esté, menos irregularidad y viceversa.

Tras haber calculado la potencia media anual se puede tener una primera idea de qué localizaciones serían las más adecuadas para la instalación de un dispositivo WEC, como ya se ha comentado. Además, cuando se tienen todos los valores de los indicadores de variabilidad para todos los puntos, se puede acotar el número de puntos potencialmente apropiados y facilitar su elección. En el próximo capítulo se detallan los resultados que ofrecen los tres coeficientes y su interpretación.

### 4.3. Aplicación a la producción de energía

#### 4.3.1. Producción energética

A partir de la potencia se puede conocer la energía en un espacio de tiempo determinado mediante la siguiente relación:

$$E(t) = P \cdot t$$

En el estudio del oleaje el período de tiempo de interés para la producción energética es un año, es decir, la producción energética anual. Por lo tanto, si se tiene en cuenta que la energía se mide en vatios por hora (Wh), para conocer este dato se ha de multiplicar la potencia por las horas de un año entero, de forma que se obtendrán vatios por hora por metro de cresta de ola. Esta medida de tiempo se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{horas en 1 año} = 1 \text{ año} \cdot 365 \text{ días} \cdot 24 \text{ horas} = 8760 \text{ h}$$

De modo que:

$$E = P \cdot 8760 \text{ (Wh/m)}$$

De la misma forma que se sabe cuál es el punto con mayor potencia, se sabrá cuál es la que tiene una energía mayor. A partir de esta información y la que arrojen los coeficientes de variabilidad, se seleccionarán los puntos con mayor potencial para ser explotados a través de la instalación de un dispositivo WEC, como se ha expuesto en el apartado anterior.

Tras haber escogido los puntos potencialmente explotables se ha de calcular la producción energética que generaría la instalación de los convertidores de energía del oleaje, tanto para la del Pelamis como para la del Wave Dragon. Para ello, primero se ha de diseñar la tabla de encuentros de cada punto. Esta tabla indica la cantidad de registros que se encuentran dentro de un cierto rango de alturas de ola y de períodos. Por ejemplo, cuántos datos tienen una altura de ola entre 2 y 2,5 m y un período entre 6,5 y 7 s. Estos dos rangos se indicarían en la tabla como 2,5 m y 7 s, la opción más conservadora. Los límites de la tabla los marcarán las matrices de potencia de los WEC, que se explicarán a continuación.

Cada dispositivo WEC cuenta con una matriz de potencia diferente en función de su tipo. Esto es debido a que cada uno de ellos genera una cantidad de energía diferente para cada tipo de ola que incide, en función de su altura y su período. Hay olas que son demasiado grandes o demasiado pequeñas, o tienen un período demasiado grande o demasiado pequeño (en relación con su altura), y no son aprovechables para el dispositivo. Otras, en cambio, pueden favorecer la producción máxima al hacer que el dispositivo pueda desarrollar su potencia máxima.

En el caso del Pelamis, la potencia máxima instalada es de 750 kW, mientras que para el Wave Dragon es de 7.000 kW (modelo para oleaje de 36 kW/m). Para el primero, las olas pueden ser de hasta 7 m de altura con saltos de 0,5 m, al igual que para el segundo, aunque éste con saltos de 1 m. Los períodos de las olas del Pelamis van desde los 5 s con saltos de 0,5 s (aunque se incluyen las olas con período entre 0 y 5 s en la columna de los 5 s) hasta los 13 s, mientras que para el Wave Dragon los períodos van desde los 5 s con saltos de 1 s hasta los 17 s. Las matrices de potencia de ambos dispositivos se muestran en las tablas 4.3 y 4.4.

Una vez se conocen los límites de la tabla de encuentros, marcados por las matrices de potencia, se puede proceder a su definición. Este largo proceso se hace a partir de todos los registros de los puntos escogidos. Finalmente, la tabla ha de quedar con el mismo formato que las matrices de potencia, ya que posteriormente se habrá que trabajar con ellas conjuntamente.

Para conocer la producción energética en un punto se han de multiplicar la tabla de encuentros y la matriz de potencia del dispositivo pertinente. No obstante, para que la matriz o tabla resultante sea válida, se han de convertir previamente las unidades de la tabla de encuentros, que se hallan en “número de sucesos con X altura de ola e Y período” en porcentaje de tiempo que se da ese suceso. Para lograrlo, se ha de realizar la siguiente operación con cada una de las celdas de la tabla:

$$\% \text{ tiempo} = \frac{n^{\circ} \text{ sucesos}}{n^{\circ} \text{ sucesos totales}} \cdot 100$$

donde el nº de sucesos totales es para cada punto 128.525.

Al realizar la conversión de la tabla en porcentajes de tiempo ya se puede multiplicar por la matriz de potencia. Como el objetivo es conocer la producción energética en un punto determinado con la instalación de un dispositivo WEC, interesa que la tabla final esté expresada en MWh. Esto significa que la multiplicación se ha de hacer con las siguientes conversiones:

$$\text{Producción energética (celda)} = \frac{\% \text{ tiempo (celda)}}{100} \cdot \frac{\text{potencia matriz (celda)} \cdot 8760}{1000}$$

El denominador 1.000 tiene la función de convertir los kW de la matriz de potencia en MW, mientras que el numerador 8760 convierte la potencia (W) en energía (Wh). El resultado final estará en MWh, como se deseaba.

Esta tabla final representa la producción energética en el punto para cada tipo de ola, en función de su altura y período. Para conocer la producción energética total únicamente hay que sumar todas las celdas de la tabla. El resultado final se expresará en GWh.

Los resultados finales tanto para la instalación del Pelamis como para la del Wave Dragon se muestran en el próximo capítulo.

### 4.3.2. Factores de capacidad

El cálculo de la producción energética en un punto, aparte de determinar su valor, tiene más aplicaciones. Tras todo el proceso anterior (cálculo de la potencia media anual, elección de los puntos con más potencial y cálculo de la producción energética en esos puntos), la decisión final de determinar si la instalación de un dispositivo convertidor de energía del oleaje es factible para una futura explotación reside en el cálculo del factor de capacidad. Este índice se obtiene a partir de la producción energética que se mencionaba.

El factor de capacidad indica cuánta cantidad de energía se ha podido aprovechar a partir del oleaje incidente en función del máximo nivel que se podría alcanzar, teniendo en cuenta la potencia del aparato. Para determinar este factor se ha de realizar el siguiente cálculo:

$$CF = \frac{\text{Producción energética obtenida}}{\text{Producción energética máxima posible}}$$

El resultado estará comprendido entre 0 y 1, donde el 0 significaría que no se produciría energía y el 1 que la energía producida sería máxima. Se podría expresar el resultado en tanto por ciento multiplicándolo por cien. La producción energética obtenida es el valor resultante de los cálculos que se han explicado en el apartado anterior. La producción energética máxima posible es la energía máxima que se podría generar si todas las olas que incidiesen en el dispositivo permitiesen desarrollar su potencia máxima (750 kW para el Pelamis y 7.000 kW para el Wave Dragon), es decir, la energía que se obtendría si el dispositivo operase todo el tiempo a máxima potencia. Dicho valor se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{Producción energética máxima posible Pelamis} = \frac{750 \cdot 8760}{1000} = 6570 \text{ MWh}$$

$$\text{Producción energética máxima posible Wave Dragon} = \frac{7000 \cdot 8760}{1000} = 61320 \text{ MWh}$$

La potencia máxima se ha de multiplicar por las horas que contiene un año para obtener el resultado en kWh anuales, y se ha de dividir por mil para obtenerlo en MWh. Una vez se conocen los valores pertinentes, ya se pueden obtener los factores de capacidad.

Para que la instalación del dispositivo WEC resulte factible, el factor de capacidad que se obtenga ha de ser como mínimo superior a aproximadamente 0,20. Por otra parte, es recomendable que su valor sea superior a 0,30. Esto significaría que se está aprovechando gran parte de la potencia del aparato a partir de la energía que se recibe.

Estos criterios son los que a primera instancia permiten decidir la factibilidad de la instalación de los WEC, ya que si el factor de capacidad no superase los valores mínimos, no sería recomendable proceder. En cambio, si no alcanzase el valor deseado, seguiría siendo factible, aunque en menor medida. Si esto ocurriese, se debería comprobar la factibilidad económica, ya que la factibilidad técnica no sería determinante.

Los resultados que se han obtenido de los factores de capacidad para el caso de estudio están expuestos en el siguiente capítulo. Con su lectura, se podrá determinar si el objetivo inicial de este trabajo se cumple o no, o qué dispositivos son los más apropiados para instalar en un futuro.

#### **4.3.3. Tiempo de inactividad (*Idle time*)**

Por último, otro factor que se puede calcular para ayudar a interpretar los resultados es el *Idle time* o tiempo de inactividad. Este indicador sirve para conocer qué porcentaje de tiempo el dispositivo está produciendo energía. Debido a que las matrices de potencia tienen ciertos límites, hay ocasiones en que las olas que inciden no permiten la generación de energía por parte del WEC. Cuando esto ocurre, se dice que es el aparato está inactivo.

Para obtener el valor del índice se ha de realizar la siguiente operación:

$$Idle\ time = \frac{100 - (suma\ del\ \% \ de\ tiempo\ en\ el\ que\ el\ dispositivo\ produce\ energía)}{100}$$

El resultado estará comprendido entre 0 y 1, al igual que el factor de capacidad. Si fuese 1, significaría que ninguna ola incidente habría hecho que el dispositivo generase energía, y si fuese 0, significaría que todas las olas incidentes habrían hecho posible que el aparato generase energía. Se podría expresar en tanto por ciento multiplicando el resultado por cien. La suma del porcentaje de tiempo en el que el dispositivo produce energía se obtiene a partir de la tabla de encuentros que está expresada en % de tiempo. Las celdas que se han de sumar están dentro de los mismos rangos de altura y período de ola que las que producen energía de la matriz de potencia. Es decir, si se observan las matrices de potencia de las tablas 4.3 y 4.4, se puede comprobar que únicamente para ciertos rangos de altura y período de ola los dispositivos son capaces de generar energía, y cuando estos rangos coinciden en la tabla de encuentros, se suman los valores de sus celdas.

Los resultados de este último factor, expuestos en el siguiente capítulo, ayudarán a comprender por qué los valores de los factores de capacidad han resultado ser tal como los que se han obtenido.



Hs (m)	Te (s)																
	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	0	0	0
1.5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33
2	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59
2.5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92
3	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132
3.5	0	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180
4	0	0	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	367	237	213
4.5	0	0	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266
5	0	0	0	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328
5.5	0	0	0	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355
6	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415
6.5	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481
7	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525

Tabla 4.3. Matriz de potencia del Pelamis (kW)

Hs (m)	Te (s)													
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	160	250	360	360	360	360	360	360	320	280	250	220	180	
2	640	700	840	900	1190	1190	1190	1190	1070	950	830	710	590	
3	0	1450	1610	1750	2000	2620	2620	2620	2360	2100	1840	1570	1310	
4	0	0	2840	3220	3710	4200	5320	5320	4430	3930	3440	2950	2460	
5	0	0	0	4610	5320	6020	7000	7000	6790	6090	5250	3950	3300	
6	0	0	0	0	6720	7000	7000	7000	7000	7000	6860	5110	4200	
7	0	0	0	0	0	7000	7000	7000	7000	7000	7000	6650	5740	

Tabla 4.4. Matriz de potencia del Wave Dragon (kW)

## 5. RESULTADOS

En este capítulo, además de presentar los resultados de los conceptos expuestos en el capítulo anterior, se discutirán los mismos para comprobar la consecución de los objetivos. En un primer apartado se mostrarán los valores obtenidos para las distintas distribuciones de potencias y en un segundo apartado se indicará la producción energética de los puntos y los dispositivos convertidores de energía del oleaje.

### 5.1. Potenciales extraídos

El conjunto de los 23 puntos SIMAR-44 en el período de tiempo que comprende desde 1958 hasta 2001 con el que se ha trabajado cuenta con varios parámetros de interés, tal como se ha indicado en el capítulo anterior. Estos parámetros se han presentado en la hoja de cálculo para su posterior tratado de la siguiente forma [tabla 5.1]:

Año	Mes	Día	Hora	Hs (m)	Tp (s)	$\theta$ (°)
1958	1	5	0	3	16,4	323
1958	1	5	3	2,8	16	323
1958	1	5	6	2,7	15,6	322
1958	1	5	9	2,6	15	324
1958	1	5	12	3	14,6	344
1958	1	5	15	3	14,2	349
1958	1	5	18	2,6	13,7	346
1958	1	5	21	2,5	13,4	353
1958	1	6	0	2,7	13,1	14
1958	1	6	3	2,7	7,6	30
1958	1	6	6	2,4	7,7	37
1958	1	6	9	2,3	7,4	42
			.			
			.			
			.			
2001	12	29	12	2	5,2	147
2001	12	29	15	2	11,2	151
2001	12	29	18	1,8	11,2	168
2001	12	29	21	1,6	11,2	207
2001	12	30	0	1,5	11,1	225
2001	12	30	3	1,5	11,1	210
2001	12	30	6	1,6	11,1	181
2001	12	30	9	1,8	5,2	168
2001	12	30	12	1,9	5,6	167

Tabla 5.1. Presentación de los datos con los que se ha trabajado en el punto 23

A partir de estos datos se han calculado el período energético ( $T_e = 0,9 T_p$ ) y la potencia asociada ( $P = 0,491 T_e H_s^2$ ), como se muestra en el ejemplo del primer registro de un punto [tabla 5.2]:

Año	Mes	Día	Hora	Hs (m)	Tp (s)	$\theta$ (°)	Te (s)	P (kW/m)
1958	1	5	0	3	16,4	323	14,76	65,22

Tabla 5.2. Cálculo del período energético y la potencia del primer registro del punto 23

A partir de la media de las potencias de todos los registros de los que se dispone (128.525), se obtiene el relevante dato de la potencia media anual de cada uno de los puntos [tabla 5.3]:

Punto	Potencia media anual (kW/m)
1	9,25
2	12,66
3	17,61
4	21,49
5	23,20
6	26,08
7	25,69
<b>8</b>	<b>27,33</b>
<b>9</b>	<b>28,62</b>
<b>10</b>	<b>29,94</b>
<b>11</b>	<b>28,76</b>
<b>12</b>	<b>27,40</b>
13	26,29
14	24,97
<b>15</b>	<b>25,95</b>
16	23,08
17	19,12
18	20,11
19	19,41
20	12,70
21	7,83
22	8,14
23	14,39

Tabla 5.3. Potencia media anual de cada punto

Tal como se había pronosticado en capítulos anteriores [capítulo 2.2, capítulo 3.2, capítulo 4.2.1], tanto en los puntos ubicados más al norte como los que se encuentran más al sur presentan una potencia inferior al resto al tener barreras físicas (la punta suroeste de la península ibérica y las Islas Canarias respectivamente) que impiden el desarrollo del oleaje al disminuir su *fetch*. Este hecho se contempla más claramente en el siguiente gráfico [figura 5.1], que representa los datos de la tabla anterior:

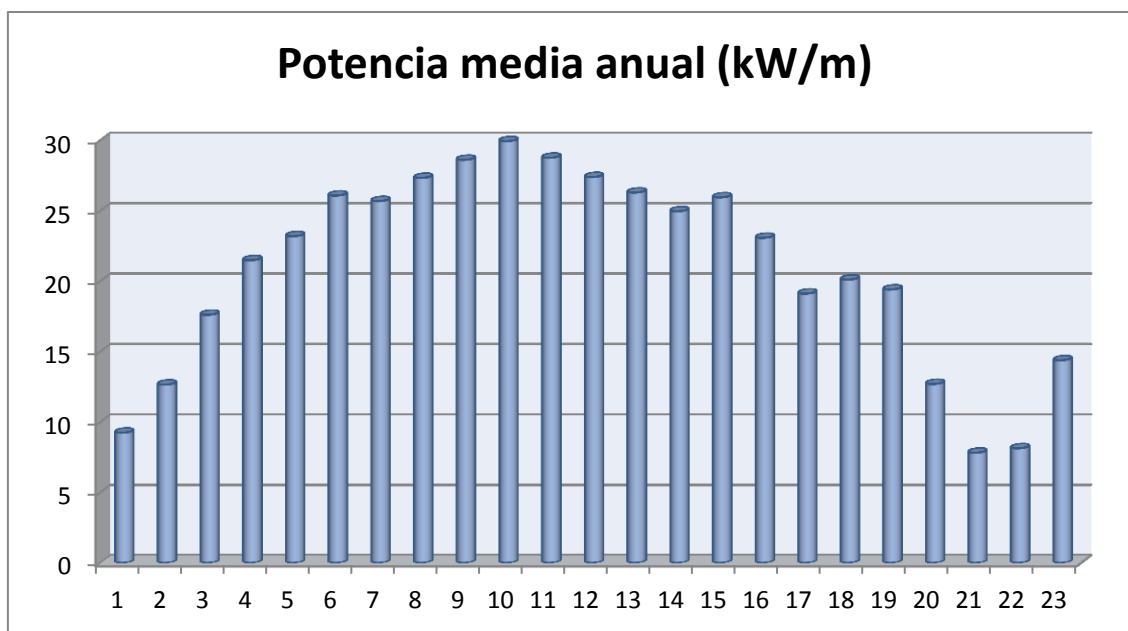


Figura 5.1. Representación gráfica de las potencias medias anuales de los 23 puntos

El punto 1 es el más septentrional, mientras que el punto 23 es el más meridional. Al haber una dirección predominante supuestamente de carácter norte y/o noroeste, se observa que sobre todo en la zona de las Islas Canarias el potencial del oleaje se ve disminuido claramente. Los puntos con un oleaje más energético se encuentran en la zona central, aproximadamente entre los puntos 6 y 15, ambos inclusive.

El punto más energético es el número 10 al alcanzar prácticamente los 30 kW/m de potencia. Si se comparan estos datos con los recopilados en estudios cercanos de las Islas Canarias [capítulo 2.2], las potencias medias anuales máximas de todos alcanzan valores similares, alrededor de los 30 kW/m. Este hecho da una primera idea de la factibilidad del aprovechamiento de la energía del oleaje en esta zona.

Una vez conocidas las potencias medias anuales de todos los puntos de estudio se ha de proceder a la selección de los puntos que cuenten con un oleaje con suficiente potencial para en un futuro poder ser explotado. Para el caso del estudio se ha decidido seleccionar los puntos 8-12 y 15 (resaltados en la tabla 5.3). Los cinco primeros puntos han sido seleccionados al ser los que presentan una potencia mayor. En cambio, el número 15, pese a tener una potencia menor en comparación con el punto 13, ha sido escogido en función de los resultados de sus coeficientes de variabilidad, como se comenta de forma más extensiva a final de este apartado.

Para realizar un análisis más exhaustivo de la potencia del oleaje se han de estudiar las distribuciones tanto temporales como direccionales. La primera, además, servirá para determinar los coeficientes de variabilidad previamente mencionados.

Para analizar la distribución temporal primero se ha de realizar un estudio de la distribución mensual, para después poder generar una distribución estacional. En el caso de la primera, se han obtenido los siguientes resultados [tabla 5.4] para cada uno de los 23 puntos:

Punto\Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	18.71	18.71	13.93	8.96	5.36	3.09	2.04	2.04	3.04	6.63	10.35	18.59
2	25.80	25.50	18.91	11.89	7.11	4.18	2.84	2.92	4.45	9.50	14.20	25.27
3	35.92	34.65	25.97	16.16	9.56	5.74	4.07	4.41	6.96	14.41	19.77	34.57
4	43.27	41.22	31.44	19.76	11.61	7.00	5.12	5.65	9.02	18.36	24.77	41.66
5	45.71	43.32	33.88	21.64	12.74	7.75	5.81	6.48	10.40	20.61	27.20	43.81
6	51.01	48.31	38.12	24.17	14.28	8.71	6.71	7.46	11.86	23.43	30.89	49.09
7	48.92	46.39	37.33	24.28	14.58	9.08	7.28	8.02	12.41	23.60	30.43	46.93
8	51.15	48.37	39.60	26.27	15.78	9.80	8.08	8.89	13.61	25.43	32.82	49.23
9	53.52	50.23	41.30	27.45	16.36	10.19	8.73	9.60	14.37	26.74	34.48	51.47
10	54.19	51.05	42.93	29.24	17.78	11.43	10.52	11.45	15.76	28.03	35.85	52.11
11	51.80	48.59	41.36	28.34	17.41	11.38	10.31	11.15	15.30	26.88	34.10	49.48
12	49.63	46.65	39.68	26.98	16.61	10.87	9.65	10.40	14.50	25.54	32.14	47.03
13	47.70	44.85	38.35	26.01	16.00	10.41	9.11	9.75	13.86	24.59	30.79	45.00
14	45.57	42.89	36.68	24.65	15.10	9.71	8.36	8.96	13.03	23.36	29.27	42.87
15	45.64	43.33	38.08	26.29	16.38	10.88	10.06	10.47	13.94	23.94	30.12	43.11
16	39.32	37.10	33.23	23.80	15.10	10.21	9.99	10.26	12.88	21.40	26.89	37.43
17	32.06	30.26	27.30	19.76	12.59	8.48	8.56	8.79	10.80	17.97	22.61	30.75
18	33.07	31.19	28.50	21.04	13.43	9.10	9.72	9.88	11.52	18.71	23.91	31.81
19	31.07	29.30	27.20	20.57	13.24	9.06	10.28	10.29	11.34	17.89	23.17	29.96
20	18.94	18.18	17.38	13.92	9.25	6.73	8.46	8.14	7.68	11.14	14.58	18.29
21	9.50	9.17	9.70	9.27	6.52	5.59	8.34	7.72	5.25	5.70	7.90	9.27
22	11.68	11.18	11.08	9.21	6.24	5.06	7.04	6.53	4.84	5.84	8.22	10.86
23	25.03	23.41	21.22	14.62	9.06	6.11	6.92	7.01	7.82	12.80	16.19	22.87

Tabla 5.4. Distribución mensual de la potencia media en cada punto

A partir de estos datos se puede realizar la media de cada mes para así conocer el mes más energético y el menos energético. En la siguiente tabla [tabla 5.5] se muestran los resultados, y en la imagen posterior [figura 5.2], su representación:

Mes	Potencia media (kW/m)
Enero	37,79
Febrero	35,82
Marzo	30,14
Abril	20,62
Mayo	12,70
Junio	8,29
Julio	7,74
Agosto	8,10
Septiembre	10,64
Octubre	18,80
Noviembre	24,38
Diciembre	36,15

Tabla 5.5. Distribución mensual media de la potencia media

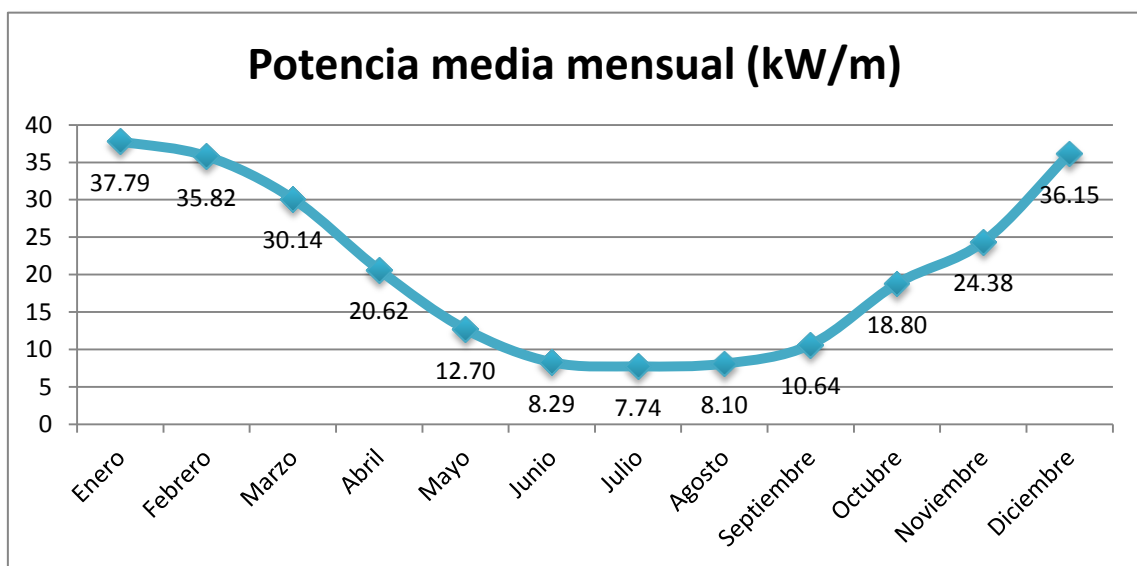


Figura 5.2. Representación gráfica de las potencias medias mensuales

El mes con una potencia media mayor resulta ser el primero del año, enero, con un valor de este parámetro de 37,79 kW/m. A continuación le sigue febrero con una potencia también bastante elevada, y después prosiguen una serie de meses con un descenso notable de su energía. Ésta se estabiliza en los meses estivales, alcanzando su mínimo registro en julio al resultar una potencia media de 7,74 kW/m. Luego llega un ascenso moderado aunque constante del nivel de energía hasta que llega al último mes del año, diciembre, mes en el que se alcanza la segunda potencia media más alta.

Con el conocimiento de estos datos, tanto los de la distribución mensual de todos los puntos como los de la media, se puede generar fácilmente la distribución estacional, la cual se muestra en las tablas a continuación [tabla 5.6, tabla 5.7] con su consiguiente representación gráfica [figura 5.3]:

Punto\Estación	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
1	9,42	2,39	6,67	18,67
2	12,64	3,31	9,38	25,52
3	17,23	4,74	13,71	35,05
4	20,94	5,92	17,39	42,05
5	22,75	6,68	19,41	44,28
6	25,52	7,63	22,06	49,47
7	25,39	8,13	22,15	47,41
8	27,22	8,92	23,95	49,59
9	28,37	9,51	25,19	51,74
10	29,98	11,13	26,55	52,45
11	29,04	10,95	25,43	49,96
12	27,76	10,31	24,06	47,77
13	26,79	9,76	23,08	45,85
14	25,48	9,01	21,89	43,78
15	26,92	10,47	22,67	44,03
16	24,04	10,15	20,39	37,95
17	19,88	8,61	17,13	31,02
18	20,99	9,57	18,05	32,02
19	20,34	9,88	17,46	30,11
20	13,52	7,77	11,13	18,47
21	8,50	7,22	6,29	9,31
22	8,84	6,21	6,30	11,24
23	14,96	6,68	12,27	23,77

Tabla 5.6. Distribución estacional de la potencia media (kW/m) en cada punto

Estación	Potencia media (kW/m)
Primavera	21,15
Verano	8,04
Otoño	17,94
Invierno	36,59

Tabla 5.7. Distribución estacional media de la potencia media

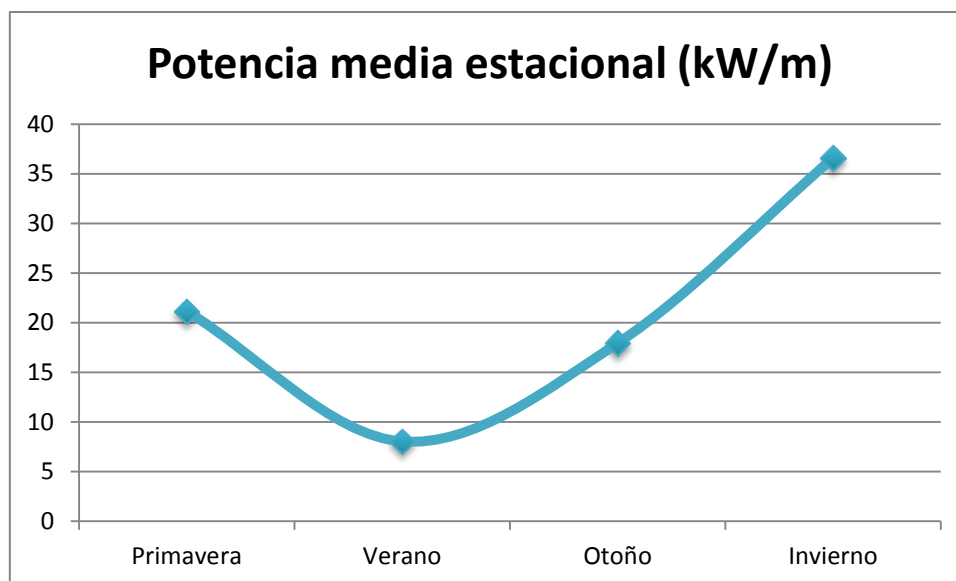


Figura 5.3. Representación gráfica de las potencias medias estacionales

Como era de esperar, al encontrarse la zona de estudio en el hemisferio norte (litoral atlántico marroquí), la estación más energética es el invierno. La causa de esto es la climatología más adversa que se da durante esta época del año. Por otra parte, en el verano sucede todo lo contrario, ya que el clima es más calmado. Tanto la primavera como el otoño presentan unas potencias medias similares, ligeramente superior para la primera, y cercanas al promedio total (potencia media para todas las estaciones del año y todos los puntos analizados), que resulta ser de 20,93 kW/m.

Para poder estudiar más detenidamente las variaciones de la distribución estacional entre los puntos se ha de recurrir a los coeficientes de variabilidad. Previamente a ello, se ha procedido a analizar la distribución direccional del oleaje. Se ha decidido estudiar únicamente la direccionalidad de los puntos potencialmente aptos para el aprovechamiento de la energía de las olas. Estos puntos han sido elegidos en función de su potencia media anual, como ya se ha comentado anteriormente, y sus coeficientes de variabilidad, que se explicarán al final de este apartado.

Las rosas de oleaje finalmente se han diseñado mediante la hoja de cálculo como un gráfico radial, dada la complejidad o imposibilidad (por el elevado número de datos) de realizar una rosa de oleaje como la explicada en el capítulo anterior. La web de Puertos del Estado, sin embargo, facilita una función que genera la rosa de oleaje de cualquier punto para cualquier período de tiempo en el que se tengan registros, de modo que a partir de esta base se han verificado los datos con los que se ha trabajado.

Antes de mostrar las direcciones del oleaje en cada uno de los puntos se ha seleccionado el punto 8 como ejemplo preliminar. El resultado se ha comparado con la rosa de oleaje generada a través de la web de Puertos del Estado del mismo punto para el mismo período (1958-2001) [figura 5.4] para corroborar los datos y la elaboración del gráfico:



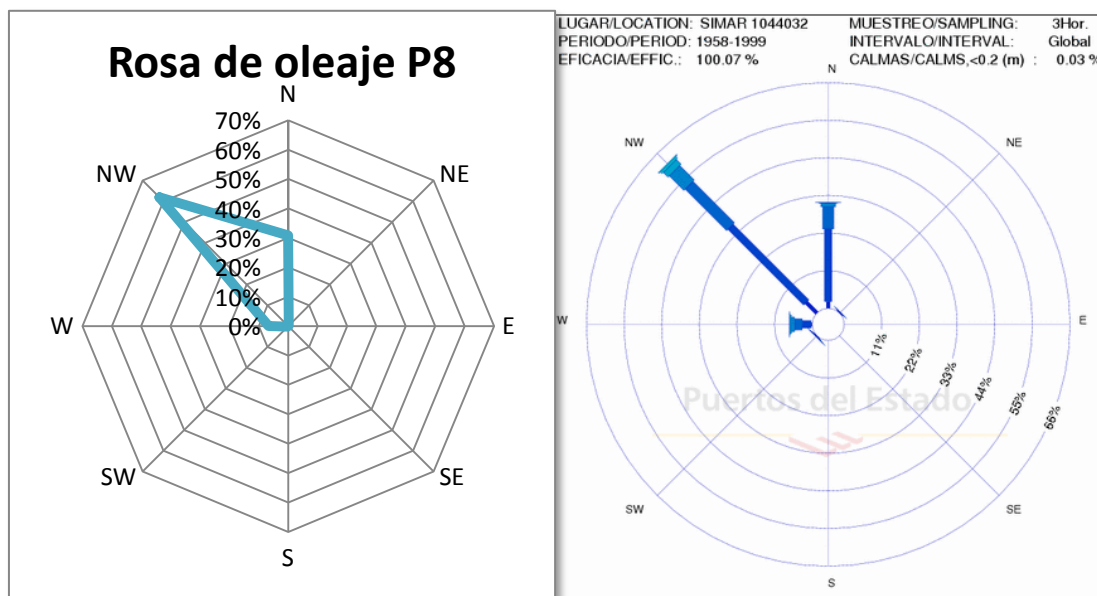


Figura 5.4. Rosa de oleaje del punto 8 a partir de los datos (izquierda) y a partir de la web de Puertos del Estado (derecha), cuya leyenda se muestra en la figura 4.5

Como se observa en la imagen anterior [figura 5.4], la similitud entre ambas rosas de oleaje, a pesar de la diferencia de formato, es muy alta. Cabe destacar que, por un error desconocido, el período de tiempo la rosa de oleaje de Puertos del Estado únicamente llega al año 1999 en vez de al 2001. Este hecho afecta el resultado final de forma prácticamente imperceptible, así que se ha decidido ignorar. También se ha de resaltar que el gráfico radial generado por la hoja de cálculo no diferencia la altura de la ola. A pesar de estas diferencias, el objetivo principal de la rosa de oleaje sigue intacto, ya que la dirección principal de las olas se puede observar claramente.

En el caso del punto 8 la dirección predominante resulta ser la noroeste, tal como se esperaba dado lo comentado en capítulos anteriores [capítulo 3.2, capítulo 4.2.3]. En esta dirección inciden más del 60% de las olas, mientras que en la dirección norte inciden más del 30%. En la dirección oeste apenas se recibe el 5% del oleaje, y en el resto de direcciones la incidencia es prácticamente nula.

Las rosas de oleaje del resto de los puntos se muestran en la imagen que se expone seguidamente [figura 5.5]. A diferencia de lo que sucede en el punto 8, en el que la dirección predominante es la noroeste, en el resto de puntos analizados tanto la dirección norte como la noroeste inciden entre un 40 y un 55%. En los puntos 10 y 11 la predominancia de la dirección norte es ligeramente superior, mientras que en el resto de puntos, 9, 12 y 15, ambas direcciones tienen un factor de incidencia similar. La diferencia en comparación con el punto 8 reside en que dicho punto se encuentra más al norte (la dirección del oleaje se va curvando hacia la derecha en el hemisferio norte a medida que se aproxima al Ecuador debido a que el viento, el causante de las olas, se ve afectado en su circulación general por la rotación terrestre) y cercano a una costa con diferente orientación que el resto de puntos [figura 3.4].

La importancia de conocer la dirección predominante del oleaje en los puntos escogidos radica en que al trabajar con dispositivos WEC no que no son del tipo absorción puntual (Pelamis y Wave Dragon), la dirección de incidencia de las olas determinará su orientación en el proceso de instalación.

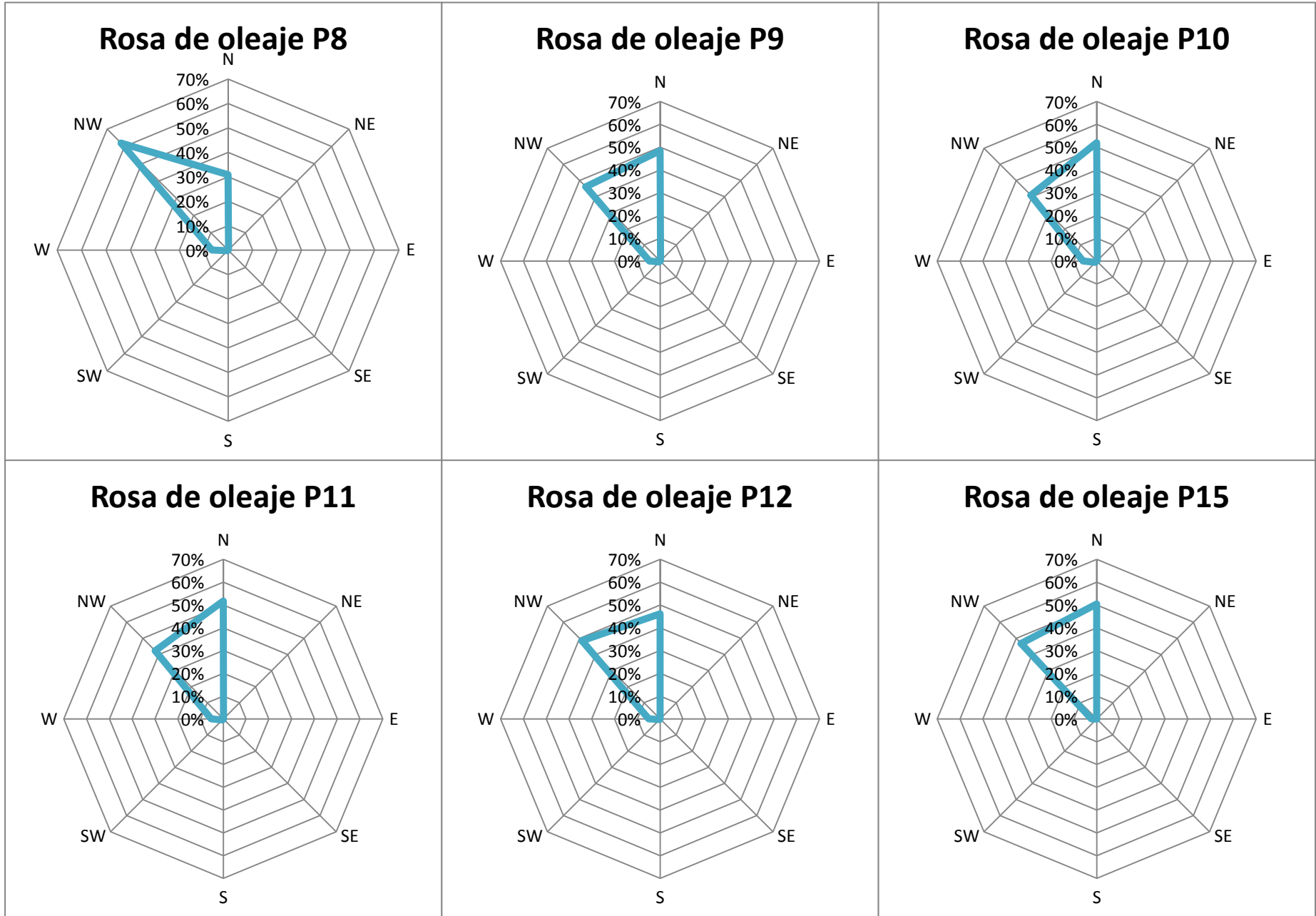


Figura 5.5. Rosas de oleaje de los puntos 8-12 y 15

Por último, en cuanto a lo relacionado con la potencia del oleaje, solamente falta exponer los coeficientes de variabilidad. Según lo explicado con anterioridad [capítulo 4.2.4], los valores que arrojen los resultados de los tres coeficientes de variabilidad, que son el coeficiente de variación (CV), el índice de variabilidad estacional (SV) y el índice de variabilidad mensual (MV), determinarán qué puntos reciben un oleaje más regular y constante y cuáles todo lo contrario.

Estos resultados para cada uno de los 23 puntos se muestran a continuación [tabla 5.8]:

Punto	Potencia media anual (kW/m)	CV	SV	MV	Potencia media anual/CV
1	9,25	2,03	1,75	1,68	4,56
2	12,66	1,93	1,75	1,70	6,55
3	17,61	1,76	1,71	1,71	10,01
4	21,49	1,67	1,67	1,68	12,84
5	23,20	1,57	1,62	1,63	14,77
6	26,08	1,54	1,60	1,62	16,95
7	25,69	1,46	1,52	1,55	17,57
8	27,33	1,41	1,48	1,51	19,32
9	28,62	1,43	1,47	1,51	19,97
10	29,94	1,36	1,38	1,42	22,09
11	28,76	1,33	1,35	1,40	21,57
12	27,40	1,35	1,36	1,41	20,34
13	26,29	1,35	1,37	1,41	19,45
14	24,97	1,36	1,39	1,43	18,35
15	25,95	1,29	1,29	1,34	20,14
16	23,08	1,26	1,20	1,26	18,35
17	19,12	1,27	1,17	1,23	15,01
18	20,11	1,25	1,11	1,19	16,15
19	19,41	1,20	1,04	1,13	16,13
20	12,70	1,13	0,84	0,96	11,25
21	7,83	1,20	0,27	0,50	6,55
22	8,14	1,03	0,62	0,81	7,88
23	14,39	1,21	1,18	1,31	11,92

Tabla 5.8. Coeficientes de variabilidad en cada punto de estudio

Como se puede observar en la última tabla [tabla 5.8], la dinámica general es que cuanto más al norte se encuentra el punto, más irregular (valor más elevado de los coeficientes de variabilidad) es el oleaje incidente. Es decir, a medida que la zona de estudio se desplaza hacia el sur, la diferencia de potencia media entre las estaciones y los meses disminuye, al igual que ocurre con la distribución general de todos los registros.

Los puntos de mayor interés son los de mayor potencia media anual. Estos puntos van desde el 8 hasta el 12. Si se reduce la exigencia, los puntos 5-7 y 13-16 cuentan con un potencial que podría resultar también de interés. Los tres primeros, los más septentrionales, se han descartado al presentar una irregularidad del oleaje bastante notable tal como indican los coeficientes de variabilidad. Por otra parte, del resto de puntos se ha decidido desmarcar el número 15 al tener un ratio potencia media anual – regularidad (se ha escogido CV al ser el más representativo) suficientemente significativo. De esta forma, los puntos seleccionados para finalmente ser analizados, tal como ya se había comentado, han sido del 8 al 12 y el 15.

## 5.2. Producción energética

Este estudio trata de analizar la posibilidad de aprovechar la energía de las olas en la costa marroquí. Por ello, es interesante conocer en qué puntos con los que se ha trabajado se presenta un oleaje más energético. Para ello, se ha de calcular la energía anual que ofrece el oleaje en cada uno de los 23 puntos.

Esta energía es directamente proporcional a la potencia media anual, de modo que los puntos con un oleaje más energético serán los mismos que presentan una potencia mayor, dato facilitado en el apartado anterior. Seguidamente se muestra una tabla con los valores de la energía anual en cada punto [tabla 5.9]:

Punto	Potencia media anual (kW/m)	Energía anual (MWh/m)
1	9,25	81,00
2	12,66	110,91
3	17,61	154,29
4	21,49	188,29
5	23,20	203,21
6	26,08	228,47
7	25,69	225,03
8	27,33	239,45
9	28,62	250,68
10	29,94	262,31
11	28,76	251,97
12	27,40	239,99
13	26,29	230,34
14	24,97	218,70
15	25,95	227,33
16	23,08	202,17
17	19,12	167,48
18	20,11	176,20
19	19,41	170,03
20	12,70	111,28
21	7,83	68,56
22	8,14	71,30
23	14,39	126,04

Tabla 5.9. Energía anual en cada punto

Al igual que ocurre con la potencia media anual, los puntos con un oleaje con una energía mayor son los que van del 6 al 15. Estos puntos se encuentran en la zona media del litoral marroquí.

Lógicamente, vuelve a ser el punto 10 el que contiene una mayor energía, la cual llega a alcanzar los 262,31 MWh/m.

Una vez se conocen los puntos con un potencial mayor para la explotación de la energía del oleaje y los motivos que han acarreado esta selección, se debe calcular qué producción energética se puede llegar a generar en estos puntos en función del dispositivo WEC que se instale y si es factible realizar su instalación o no. En este estudio se ha tratado con dos aparatos de este tipo: el Pelamis y el Wave Dragon.

Tal como se ha explicado en el capítulo anterior, primero se han de diseñar las tablas de encuentros que indican qué tipo de olas inciden en el punto de estudio en función de su altura significativa y su período. Los rangos  $H_s-T_e$  se definen en función de la matriz de potencia del aparato con el que se esté trabajando. Para poder tratar con la tabla de encuentros se ha de pasar el número de incidencias (número de registros con un oleaje que esté contenido en el rango de la celda) a porcentaje de tiempo que se da ese tipo de oleaje (por ejemplo, porcentaje de tiempo que inciden olas con una altura significativa de entre 3 y 3,5 m y un período de entre 8,5 y 9 s). Estas tablas están expuestas en el anejo correspondiente para cada uno de los puntos que se ha analizado.

Sin embargo, se ha escogido el punto 10, al ser el más energético, como ejemplo de estas tablas en este capítulo. Al final del mismo se muestran cada una de las tablas de encuentros resultantes en función del dispositivo WEC con el que se ha trabajado [tabla 5.10, tabla 5.12]. Las celdas de color verde son las que cuentan con un número de incidencias de ola muy bajo o nulo, mientras que en las de color rojo ocurre todo lo contrario, es decir, el oleaje más frecuente se encuentra en esos rangos. Las de color amarillo marcan la zona intermedia. En el ejemplo expuesto se pueden llegar a distinguir dos zonas de celdas remarcadas en rojo. La primera de ellas, la que cuenta con unos períodos de ola más bajos, corresponde al oleaje tipo sea o mar de viento, mientras que la que otra, la que cuenta con unos períodos de ola más altos, corresponde al oleaje tipo swell o mar de fondo.

Tras calcular estas tablas, el siguiente paso es saber cuánta energía produce cada una de sus celdas (cada rango  $H_s-T_e$ ). Para ello se ha de multiplicar cada tabla de encuentros por la matriz de potencia del aparato que le corresponda. El resultado para el caso del punto 10 se muestran en las tablas pertinentes [tabla 5.11, tabla 5.13] al final del capítulo. Las celdas remarcadas en negrita son las que producen más energía por cada ola, es decir, las que en la matriz de potencia del dispositivo se dispone de mayor potencia (750 kW para Pelamis y 7.000 kW para Wave Dragon). De esta forma se puede saber si el tipo de oleaje es más o menos adecuado (si inciden muchas o pocas olas en las celdas remarcadas). Al analizar las tablas se observa que, sobre todo en el caso del Pelamis (al producir energía en unos rangos de  $T_e$  más pequeños), los dispositivos aprovechan su máxima capacidad en un reducido número de ocasiones.

No obstante, el principal parámetro que determina la factibilidad de la instalación de un dispositivo WEC es el factor de capacidad. Para su cálculo previamente se ha de conocer la producción energética total del aparato en el punto indicado. Para obtenerlo simplemente se han de sumar cada una de las celdas de las tablas de aporte energético. El resultado para cada uno de los seis puntos seleccionados para el análisis en función del aparato con el que se ha trabajado se muestra en la tabla correspondiente [tabla 5.14].

Punto\WEC	Energía Pelamis (GWh)	Energía Wave Dragon (GWh)
8	0,87	14,86
9	0,89	15,03
10	1,00	15,76
11	0,97	15,40
12	0,91	14,72
15	0,93	14,26

Tabla 5.14. Aporte energético total del Pelamis y el Wave Dragon en cada uno de los seis puntos de estudio escogidos

Como era de esperar, el punto en el que se produce mayor energía es el punto 10. La máxima que se alcanzaría a través de la instalación del Wave Dragon es de 15,76 GWh. Por su parte, mediante la instalación del Pelamis se conseguiría 1 GWh. El dispositivo Wave Dragon, al tener una potencia instalada aproximadamente diez veces mayor que la del Pelamis, proporciona una energía de un orden de magnitud mayor, aunque ésta llega a ser más o menos quince veces mayor que la del Pelamis. De forma preliminar, esto es debido a que el Wave Dragon produce energía de forma más eficiente en este caso. Este hecho se analiza con más profundidad mediante el factor de capacidad.

También se observa que, en líneas generales, en los puntos con mayor potencia media anual se genera más energía, salvo pequeñas excepciones. Sin embargo, cabe destacar que el punto 15, que cuenta con una potencia inferior, llega a ser el tercero más productivo en el caso de la instalación del Pelamis. En cambio, en el caso del Wave Dragon, es el menos productivo de los cinco puntos. La razón de este hecho radica en que el Pelamis se beneficia más de un oleaje más regular, aunque su producción se ve reducida con los grandes temporales (característica sobre el limitador de potencia y rendimientos menores con potencias de ola elevadas [capítulo 2.1.3.1]), circunstancia que sí aprovecha el Wave Dragon (su rango de períodos de oleaje es mayor).

Para realizar el análisis más importante para conocer si se ha logrado la consecución del objetivo referente al despliegue de los dos dispositivos WEC con los que se ha trabajado se ha de recurrir al factor de capacidad, como ya se ha comentado. En función del resultado de este análisis se sabrá si se ha conseguido cumplir el objetivo principal, que se trata de saber si se puede aprovechar la energía del oleaje en la costa marroquí.

Para conocer el valor de este factor, como ya se conoce la producción energética de ambos dispositivos en cada uno de los puntos seleccionados, únicamente se ha de dividir este valor por la producción energética que se conseguiría si el aparato operase a máxima capacidad todo el tiempo, es decir, la producción máxima posible de los dispositivos. Para el Pelamis esta producción es de 6.570 MWh, mientras que para el Wave Dragon es de 61.320 MWh.

En la tabla 5.15 se muestran los resultados de los factores de capacidad (CF) de ambos aparatos en cada uno de los seis puntos analizados.

Punto\WEC	CF Pelamis	CF Wave Dragon
8	13,17	24,23
9	13,48	24,51
10	15,20	25,70
11	14,80	25,11
12	13,79	24,00
15	14,11	23,25

Tabla 5.15. Factores de capacidad del Pelamis y el Wave Dragon en los seis puntos estudiados

Nuevamente el punto con unos factores de capacidad más óptimos es el punto 10. Antes de pasar a interpretar los resultados se ha decidido mostrar los resultados de otro factor significativo, el tiempo de inactividad o *idle time* del dispositivo, en la pertinente tabla [tabla 5.16].

Punto\WEC	Tiempo de inactividad Pelamis	Tiempo de inactividad Wave Dragon
8	13,68	0,74
9	14,81	0,94
10	14,32	0,89
11	14,17	0,87
12	14,63	0,91
15	14,33	0,88

Tabla 5.16. Tiempo de inactividad (%t) del Pelamis y el Wave Dragon en los seis puntos estudiados

Este factor está expresado en porcentaje de tiempo. Si se observan los resultados se puede determinar que el Wave Dragon aprovecha el oleaje incidente en los puntos seleccionados de forma satisfactoria, ya que más del 99% del tiempo está produciendo energía (es decir, que solamente apenas el 1% del tiempo está inactivo), ya sea a máxima capacidad o no. En cambio, el Pelamis presenta una ineficiencia mayor, debido a que casi el 15% del tiempo no produce energía alguna. La razón de esto se descubre al observar la matriz de potencia del Pelamis y compararla con las tablas de encuentros. Una parte nada despreciable de las olas tiene un período mayor a 13 s, o una altura significativa menor de 0,5 m. En estos casos, el dispositivo no produce energía al encontrarse fuera de la matriz de potencia o tener un valor nulo en ella. La matriz de potencia del Wave Dragon, por su parte, abarca prácticamente cualquier tipo de ola que incide en los puntos escogidos de la costa marroquí. Gracias a ello, el tiempo de inactividad es muy bajo.

Al tener conocimiento de estos datos se puede comprender por qué los factores de capacidad del Pelamis han resultado ser relativamente bajos en comparación con los del Wave Dragon. Los del primero no superan el mínimo exigido, que está alrededor del 20%, hecho que sí sucede con los del segundo. Sin embargo, los factores de capacidad del Wave Dragon no llegan a superar los 30 puntos, que sería el valor deseable para que la producción energética

fuese altamente eficiente y el precio del MWh se viese reducido. Aun así, al superar el mínimo es factible proceder a su instalación.

En el caso del Pelamis, el máximo valor que se alcanza de factor de capacidad es 15,20 en el punto 10. Del resto de puntos hay que destacar el número 15, que pese a tener una potencia media anual inferior, de nuevo vuelve a ser la tercera mejor opción al premiar la regularidad. Todos ellos tienen un factor de capacidad por encima de los 13 puntos.

En el caso del Wave Dragon, el máximo valor es 25,70 en el punto 10, mientras que en el resto de puntos el valor disminuye en función de su potencia media anual, hasta alcanzar su mínimo en 23,25. Si no se tiene en cuenta el punto 15, todos los puntos se sitúan por encima de los 24 puntos.

En resumen, tras haber hecho todos los análisis presentados en este capítulo y si se presta atención al factor de capacidad, el índice más determinante, se puede concluir que la mejor opción es la instalación de dispositivos Wave Dragon en los puntos desde el 8 hasta el 12, e incluso en el 15. La alternativa más eficiente sería la instalación de un campo de dispositivos Wave Dragon en el punto 10, donde la producción energética alcanzaría su cenit. En función de la demanda energética requerida se constituiría un campo de un determinado número de dispositivos. Estos dispositivos, al igual que en el resto de los puntos seleccionados, deberían estar orientados hacia el norte o el noroeste (preferiblemente noroeste en el punto 8, norte en los puntos 10 y 11, indiferente en el resto) para que las olas incidiesen de forma más directa en ellos.

Un campo de dispositivos Wave Dragon en el punto 10 serviría para complementar el resto de energías renovables que abastecen la demanda energética de Marruecos y así dirigir el país hacia un futuro más sostenible y limpio.



Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0,005	0	0,002	0,005	0	0	0	0	0	0	0,002	0	0	0	0	0
1	0,321	0,193	0,269	0,363	0,480	0,854	0,661	0,750	0,438	0,297	0,300	0,157	0,162	0,086	0,058	0,056	0,032
1,5	1,487	1,323	0,692	0,947	1,173	1,905	2,021	2,684	2,084	1,702	1,906	1,295	1,315	0,745	0,573	0,312	0,261
2	0,209	1,726	2,329	1,893	1,344	1,248	1,149	1,782	1,422	1,632	2,312	1,967	2,347	1,651	1,589	0,966	0,605
2,5	0	0,124	0,909	1,801	0,984	0,824	0,621	0,669	0,522	0,696	1,178	1,327	1,817	1,660	1,741	1,433	0,921
3	0	0,004	0,081	0,445	0,426	0,381	0,266	0,293	0,223	0,286	0,358	0,451	0,798	0,985	1,208	1,253	0,995
3,5	0	0,001	0,002	0,050	0,131	0,239	0,165	0,141	0,101	0,094	0,140	0,182	0,281	0,366	0,587	0,712	0,587
4	0	0	0,001	0,005	0,024	0,062	0,100	0,092	0,058	0,053	0,072	0,077	0,127	0,114	0,180	0,253	0,265
4,5	0	0	0	0,001	0,002	0,009	0,040	0,049	0,025	0,037	0,040	0,043	0,066	0,060	0,050	0,085	0,090
5	0	0	0	0	0	0,002	0,006	0,013	0,026	0,019	0,023	0,021	0,037	0,034	0,028	0,035	0,045
5,5	0	0	0	0	0	0	0,002	0,009	0,009	0,019	0,014	0,012	0,009	0,018	0,010	0,016	0,019
6	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,005	0,005	0,005	0,007	0,006	0,010	0,010	0,010	0,013
6,5	0	0	0	0	0	0	0,002	0	0,002	0,004	0,002	0,001	0,003	0,005	0,004	0,004	0,003
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,002	0,001	0,003	0,002	0	0,002

Tabla 5.10. Tabla de encuentros del punto 10 (%t) para trabajar con Pelamis

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,37	0,68	1,08	1,56	2,84	2,20	2,43	1,34	0,83	0,76	0,36	0,33	0,16	0	0	0
1,5	4,17	5,79	3,94	6,30	8,53	14,36	15,23	19,52	14,24	10,74	10,85	6,70	6,10	3,07	2,11	1,01	0,76
2	1,05	13,30	23,46	22,55	17,43	16,73	15,30	22,94	17,19	18,15	23,50	17,92	19,12	12,00	10,30	5,58	3,13
2,5	0	1,50	14,33	33,45	19,92	17,18	12,94	13,48	9,88	12,13	18,68	18,94	23,24	18,91	17,69	12,93	7,42
3	0	0,07	1,84	11,89	12,40	11,36	7,74	8,07	5,71	6,65	7,52	8,66	14,69	16,22	17,68	16,35	11,51
3,5	0	0,02	0,07	1,81	5,02	9,21	6,13	4,98	3,34	2,99	4,00	4,66	6,40	7,38	11,05	12,60	9,25
4	0	0	0,03	0,21	1,14	2,98	4,62	4,01	2,43	1,99	2,41	2,47	3,77	3,02	5,78	5,25	4,94
4,5	0	0	0	0,04	0,09	0,53	2,23	2,53	1,23	1,69	1,64	1,62	2,21	1,87	1,47	2,23	2,10
5	0	0	0	0	0	0,15	0,39	0,80	1,51	0,99	1,10	0,96	1,54	1,25	0,91	1,07	1,30
5,5	0	0	0	0	0	0	0,15	0,56	0,60	1,09	0,81	0,64	0,40	0,78	0,40	0,54	0,60
6	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,36	0,36	0,34	0,39	0,34	0,49	0,45	0,42	0,48
6,5	0	0	0	0	0	0	0,10	0	0,10	0,26	0,15	0,05	0,18	0,25	0,20	0,17	0,13
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,15	0,05	0,18	0,08	0	0,07

Tabla 5.11. Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 10 (MWh) para trabajar con Pelamis

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,321	0,467	0,850	1,514	1,188	0,598	0,321	0,143	0,088	0,046	0,019	0,009	0,005
2	1,696	6,069	5,358	6,324	7,973	7,553	6,925	4,557	2,144	0,992	0,531	0,217	0,137
3	0	1,117	3,657	2,092	1,707	2,517	4,393	5,594	4,602	2,282	1,182	0,482	0,201
4	0	0,004	0,209	0,566	0,392	0,359	0,667	1,247	1,816	2,109	1,247	0,437	0,212
5	0	0	0,002	0,058	0,113	0,117	0,167	0,172	0,255	0,553	0,667	0,429	0,273
6	0	0	0	0,002	0,024	0,044	0,034	0,048	0,058	0,111	0,204	0,165	0,220
7	0	0	0	0,002	0,002	0,007	0,007	0,013	0,009	0,023	0,058	0,047	0,100

Tabla 5.12. Tabla de encuentros del punto 10 (%) para trabajar con Wave Dragon

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	4,50	10,22	26,82	47,75	37,47	18,84	10,13	4,51	2,46	1,13	0,43	0,16	0,09
2	95,09	372,14	394,24	498,59	831,11	787,31	721,86	475,05	200,99	82,56	38,58	13,50	7,08
3	0	141,92	515,75	320,73	299,08	577,69	1008,23	1283,95	951,44	419,81	190,50	66,24	23,04
4	0	0	52,07	159,55	127,44	131,97	310,75	581,25	704,73	725,90	375,84	113,00	45,77
5	0	0	0	23,57	52,58	61,96	102,58	105,44	151,80	295,12	306,66	148,34	78,95
6	0	0	0	0	14,20	26,72	20,99	29,58	35,78	68,23	122,50	73,84	81,01
7	0	0	0	0	0	4,29	4,29	8,11	5,25	14,31	35,31	27,20	50,47

Tabla 5.13. Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 10 (MWh) para trabajar con Wave Dragon

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### 6.1. Conclusiones

El clima avanza de forma inexorable, de momento, hacia un destino de consecuencias imprevisibles. El cambio climático y el consecuente calentamiento global han hecho saltar las alarmas, y la urgencia de encontrar soluciones cada vez apremia más. Uno de los sectores claves en promover y dar ejemplo para alcanzar un futuro sostenible es el de la energía. El modelo energético actual alrededor del mundo no es el ideal para garantizar este futuro. Por ello, deben entrar en juego y tener un peso importante las energías renovables, energías limpias.

En el caso concreto de Marruecos, el caso del estudio, existe un plan energético, al igual que en la Unión Europea, que pretende que para el año 2020 el 42% de la energía del país provenga de fuentes renovables. Además, en este país al noroeste de África, la demanda energética va en continuo aumento, de modo que encontrar fuentes alternativas de generación de electricidad es fundamental para abastecer en un futuro próximo la totalidad de su pueblo. Es aquí donde aparece en escena la energía del oleaje, ya que podría complementar el resto de energías renovables en dicho plan. Se trata de una energía limpia, porque no genera gases de efecto invernadero, renovable, porque su producción no depende de combustibles que se agotan, de bajo impacto medioambiental y visual (ventaja respecto a los aerogeneradores de energía eólica [contaminación visual]) y de producción continua. Además, dado que el 37% de la población mundial vive en zonas costeras, este recurso se encuentra cerca de una gran parte de la demanda. El principal defecto, sin embargo, es la falta de desarrollo de este tipo de tecnología. A pesar de haber miles de patentes, su comercialización apenas se ha llevado a cabo, y la mayoría de prototipos se encuentran en fase de pruebas. El motivo de esto es la escasez de recursos económicos de los últimos tiempos, como consecuencia de la crisis económica. A medida que pasen los años los dispositivos convertidores de energía del oleaje (WEC) irán mejorando y se harán más eficientes y económicos. Hasta que llegue ese momento, la investigación en este campo es la principal baza con la que se cuenta para hallar las mejores soluciones.

Este estudio pretende formar parte de esa investigación tan necesaria. En él se ha estudiado el oleaje a partir del tratamiento de datos procedentes del modelado numérico (SIMAR-44) durante el período 1958-2001 en 23 puntos del litoral marroquí. El objetivo es ayudar a localizar el mejor emplazamiento para la instalación de un WEC. Entre los numerosos prototipos existentes se ha decidido trabajar con el dispositivo Pelamis y el Wave Dragon.

Tras tratar los miles de datos, se han seleccionado los puntos potencialmente explotables en función de su potencia media anual de oleaje y su regularidad. Estos puntos han resultado ser los localizados en la zona central de la costa de Marruecos: P8, P9, P10, P11, P12 y P15. En la parte sur del litoral, el oleaje se ve reducido por la barrera que forman las Islas Canarias. Lo mismo ocurre en la parte norte, donde la barrera la proporciona la punta suroeste de la península ibérica.

La dirección predominante de las olas es la noroeste o la norte. El P10 ha resultado ser el punto con un oleaje más energético, con una potencia media anual de prácticamente 30 kW/m, similar a los máximos de estudios cercanos (Islas Canarias). Este punto se ha perfilado como la mejor localización, pero para asegurarse de ello, es necesario calcular el aporte energético de todos los puntos mediante las matrices de operatividad de los dos WEC.

Cada dispositivo se adapta mejor a un tipo de oleaje. En este estudio se ha visto reflejado como el Pelamis se beneficia más de un oleaje regular y estable, con períodos de ola menores de 13 segundos, ya que su factor de capacidad únicamente ha sido del 15% como máximo, cuando lo mínimo exigido es el 20% aproximadamente. La razón de este resultado es que el tiempo de inactividad del aparato ronda el 14%. Por su parte, el Wave Dragon ha demostrado ser el WEC más apropiado para el oleaje de la costa de Marruecos de los dos con los que se ha trabajado. Al poder generar energía con olas de hasta 17 segundos de período su tiempo de inactividad es menor al 1%. Su factor de capacidad máximo supera el 25%. Lo ideal sería que superase el 30%, pero dado que en los rangos  $H_s-T_e$  de las tablas de encuentros en los que se desarrolla su máxima potencia tienen una baja incidencia de olas, no se da el caso. A pesar de ello, los resultados resultan suficientemente adecuados para poder recomendar la instalación del dispositivo Wave Dragon en el punto 10, el punto en el que el aparato es capaz de generar unos mayores índices de energía, donde el aporte energético es de 15,76 GWh.

En el resto de puntos también podría resultar apropiada la instalación de un dispositivo WEC como el Wave Dragon, ya que los factores de capacidad superan el 24%, a excepción del punto 15, que sólo alcanza el 23,25% al tener una potencia media anual inferior al resto. Este punto, no obstante, es el tercero que genera más energía si se trabaja con el Pelamis, ya que, como se ha dicho antes, este dispositivo premia la regularidad, hecho que se da en el oleaje de este punto.

La dirección predominante de las olas en esta zona del océano Atlántico es la norte o noroeste. En los puntos más septentrionales del litoral marroquí predomina más la dirección noroeste, pero a medida que se viaja hacia el sur, el oleaje tiende a incidir con dirección norte a causa del cambio de dirección de la circulación general del viento por el efecto Coriolis.

En conclusión, la opción más factible al tener un aprovechamiento de la energía del oleaje más eficiente que el resto de puntos estudiados es la instalación del dispositivo Wave Dragon en el punto 10 con orientación norte-noroeste (preferiblemente norte). Este punto se encuentra en la zona central del litoral marroquí.

## 6.2. Trabajo futuro

Para profundizar más en el estudio de la energía del oleaje en la costa de Marruecos se pueden seguir varias líneas de investigación.

Una de ellas podría ser analizar datos reales de oleaje de la zona de estudio y compararlos con los datos procedentes del modelado numérico que se han utilizado en este trabajo. Lo ideal sería que la boya que facilitase estos datos estuviese en una localización cercana al punto 10 o alguna próxima a los puntos seleccionados por su mayor potencial para ser explotados. Lamentablemente, actualmente no existe ninguna boya de este tipo en la costa marroquí, de modo que se tendría que realizar una vez se instale una, si se diese el caso. Sin embargo, en otros estudios sí se han podido comparar los datos de registros reales con datos de modelado numérico y se ha demostrado la veracidad de estos últimos.

Otra ampliación de la investigación que se podría realizar sería analizar los resultados que se obtendrían con el uso de otros dispositivos WEC, y no únicamente con el del Pelamis y el Wave Dragon. De esta forma se podría encontrar un aparato que aprovecharse de forma más eficiente la energía del oleaje que incide en el litoral marroquí, aunque tal vez no existe tal dispositivo y la mejor opción seguiría siendo el Wave Dragon. Otros aparatos que se podrían utilizar en el estudio serían por ejemplo el Oyster, el AquaBuoy, el PowerBuoy, el Archimedes Wave Swing, etc.

Por último, otra rama por la que podría decantarse la investigación sería por un estudio económico. En el punto escogido como el más factible para la instalación del Wave Dragon, el punto 10, se podría realizar un estudio para determinar qué cantidad de dispositivos serían necesarios instalar en un campo de Wave Dragon para abastecer la demanda requerida. Se ha de tener en cuenta que este tipo de instalaciones se benefician de economías de escala. Es decir, a mayor número de dispositivos que se instalen, más disminuirá el “precio por unidad”. El Pelamis resulta ser más barato, pero como se ha visto, su productividad en la zona de estudio no es suficientemente buena, al igual que la energía que generaría.

En definitiva, cualquier profundización en el estudio de la energía del oleaje, y más concretamente en la del oleaje incidente en la costa marroquí, sería positiva para ayudar al desarrollo de esta emergente tecnología. La energía de las olas apunta a ser una de la más eficientes y beneficiosas dentro del campo de las energías renovables, y este tipo de energías debe ser la energía del futuro para que la sostenibilidad se pueda alcanzar. Un modelo energético limpio, fiable, económico y constante es cada vez más posible, y es necesario que siga su camino.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Lenee-Bluhm P, Paasch R, Özkan-Haller HT. Characterizing the wave energy resource of the US Pacific Northwest. *Renewable Energy* 2011; 36: 2106-19
2. Beyene A, Wilson JH. Digital mapping of California wave energy resource. *International Journal of Energy Research* 2007; 31: 1156-68
3. Defne Z, Haas KA, Fritz HM. Wave power potential along the Atlantic coast of the southeastern USA. *Renewable Energy* 2009; 34: 2197-205
4. Hughes MG, Heap AD. National-scale wave energy resource assessment for Australia. *Renewable Energy* 2010; 35: 1783-91
5. Behrens S, Hayward J, Hemer M, Osman P. Assessing the wave energy converter potential for Australian coastal regions. *Renewable Energy* 2012; 43: 210-7
6. Dunnett D, Wallace JS. Electricity generation from wave power in Canada. *Renewable Energy* 2009; 34: 179-95
7. Kim G, Jeong WM, Lee KS, Jun K, Lee ME. Offshore and nearshore wave energy assessment around the Korean peninsula. *Energy* 2011; 36: 1460-9
8. Sierra JP, Mösso C, González-Marco D. Wave energy resource assessment in Menorca (Spain). *Renewable Energy* 2014; 71: 51-60
9. Vicinanza D, Contestabile P, Ferrante V. Wave energy potential in the northwest of Sardinia (Italy). *Renew Energy* 2013; 50: 506-21
10. Liberti L, Carillo A, Sannino G. Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective. *Renew Energy* 2013; 50: 938-49
11. Liang B, Fan F, Yin Z, Shi H, Lee D. Numerical modelling of the nearshore wave energy resources of Shandong peninsula, China. *Renew Energy* 2013; 57: 330-8
12. Chiu F-C, Wuang W-Y, Tiao W-C. The spatial and temporal characteristics of the wave energy resources around Taiwan. *Renew Energy* 2013; 52: 218-21
13. Stopa JE, Cheung KF, Chen Y-L. Assessment of wave energy resources in Hawaii. *Renew Energy* 2011; 36: 554-67
14. Stopa JE, Filipot J-F, Li N, Cheung KF, Chen Y-L, Vega L. Wave energy resources along the Hawaiian Island chain. *Renew Energy* 2013; 55: 305-21
15. Ortega S, Osorio AF, Agudelo P. Estimation of the wave power resource in the Caribbean Sea in areas with scarce instrumentation. Case study: Isla Fuerte, Colombia. *Renew Energy* 2013; 57: 240-8
16. Aoun NS, Harajali HA, Queffeuilou P. Preliminary appraisal of wave power prospects in Libanon. *Renew Energy* 2013; 53: 165-73
17. Henfridsson U, Nemaine V, Strand K, Kapper R, Bernhoff H, Danielson O, et al. Wave energy potential in the Baltic Sea and the Danish part of the North Sea, with reflections on the Skagerrat. *Renewable Energy* 2007; 32: 2069-84
18. Waters R, Engström J, Isberg J, Leijon M. Wave climate off the Swedish west coast. *Renewable Energy* 2009; 34: 1600-6
19. Iglesias G, López M, Carballo R, Castro A, Fragueta JA, Frigaard P. Wave energy potential in Galicia (NW Spain). *Renewable Energy* 2009; 34: 1517-24
20. Iglesias G, Carballo R. Wave energy resource in the Estaca de Bares área (Spain). *Renewable Energy* 2010; 35: 1574-84.
21. Iglesias G, Carballo R. Offshore and inshore wave energy assessment: Asturias (N Spain). *Energy* 2010; 35: 1964-72

22. Rusu E, Guedes Soares C. Numerical modelling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the Portuguese nearshore. *Renewable Energy* 2009; 34: 1501-16
23. Pontes MT, Aguiar R, Pires HO. A nearshore wave energy atlas for Portugal. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 2005; 127: 249-55
24. Mendes RPG, Calado MRA, Mariano SJPS. Wave energy potential in Portugal e assessment based on probabilistic description of ocean wave parameters. *Renewable Energy* 2012; 47: 1-8
25. Saulnier J-B, Prevosto M, Maisondieu C. Refinements of sea state statistics for marine renewables: a case study from simultaneous buoy measurements in Portugal. *Renewable Energy* 2011; 36: 2853-65
26. Rusu E, Pilar P, Guedes Soares C. Evaluation of the wave conditions in Madeira Archipelago with spectral models. *Ocean Engineering* 2008; 35: 1357-71
27. Rusu L, Guedes Soares C. Wave energy pattern around the Madeira Islands. *Energy* 2012; 45: 771-85
28. Rusu L, Guedes Soares C. Wave energy assessments in the Azores Islands. *Renewable Energy* 2012; 45: 183-96
29. Mollison D, Pontes MT. Assessing the Portuguese wave-power resource. *Energy* 1992; 17: 255-68
30. Iglesias G, Carballo R. Wave resource in El Hierro - an island towards energy self-sufficiency. *Renewable Energy* 2011; 36: 689-98
31. Sierra JP, González-Marco D, Sospedra J, Gironella X, Mösso C, Sánchez-Arcilla A. Wave energy resource assessment in Lanzarote (Spain). *Renewable Energy* 2013; 55: 480-9
32. Iglesias G, Carballo R. Wave power for La Isla Bonita. *Energy* 2010; 35: 513-21
33. Iglesias G, Veigas M. Wave and offshore wind potential for the island of Tenerife. *Energy Conversion and Management* 2013; 76: 738-45
34. Iglesias G, Veigas M, Ramos V. A wave farm for an island: Detailed effects on the nearshore wave climate. *Energy* 2014; 69: 801-12
35. Iglesias G, Veigas M, Carballo R. Wave and offshore wind energy on an island. *Energy for Sustainable Development* 2014; 22: 57-65
36. Gonçalves M, Martinho P, Guedes Soares C. Assessment of wave energy in the Canary Islands. *Renewable Energy* 2014; 68: 774-84
37. Ibanez P. Energias de las olas: situacion y futuro. Xornada sobre Energia que Ven do Mar, A Coruna 2008
38. Herman W. Quantifying global exergy resources. Global Climate and Energy Project, 556Q Peterson Laboratory, Stanford University 2005
39. Previsic M. System Level Design, Performance and Costs for San Francisco California Pelamis Offshore Wave Power Plant, San Francisco 2004
40. Ruiz JP. Aprovechamiento de la energía de las olas. 2ª Jornada Internacional sobre Energía Marina, 25 de Enero de 2007, Bilbao Exhibition Centre (Bec), Barakaldo 2007
41. EquiMar. Draft report on the state of ocean energy in Europe: technologies, test sites, and joint projects, 2011
42. ICEX. El mercado de las energías renovables en Marruecos, 2014
43. Pinet PR. Invitation to Oceanography, Fourth Edition. Colgate University 2006
44. Gunn K, Stock-Williams C. Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy* 2012; 44: 296-304

**Otra bibliografía:**

- Campins E. Estudi dels potencials efectes del canvi climàtic sobre l'energia de les ones. Aplicació pràctica. Tesina d'especialitat. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, ETSECCPB, UPC 2014
- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Disponible en: [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)
- Energías Renovables. Disponible en [www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com)
- European Marine Energy Centre (EMEC). Disponible en: [www.emec.org.uk](http://www.emec.org.uk)
- Falcão AFdO. Wave energy utilization: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010; 14; 899-918
- Hidalgo L. Análisis del potencial energético del oleaje. Aplicación a la isla de Lanzarote. Tesina de especialidad. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, ETSECCPB, UPC 2009
- International Energy Agency (IEA). Disponible en: [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Pelamis. Disponible en: [www.pelamiswave.com](http://www.pelamiswave.com)
- Puertos del Estado. Disponible en: [www.puertos.es](http://www.puertos.es)
- Villate JL, Ruiz-Minguela P, Pérez G. Energías renovables en el medio marino. Anales de mecánica y electricidad 2012; mayo-junio; 28-34
- Wave Dragon. Disponible en: [www.wavedragon.net](http://www.wavedragon.net)
- Wikipedia. Disponible en: [es.wikipedia.org](http://es.wikipedia.org)



## **ANEJOS**

ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0,009	0	0,002	0,005	0,009	0,003	0,003	0	0	0	0,005	0	0	0	0	0
1	0,399	0,385	0,457	0,685	0,834	1,336	1,015	1,179	0,696	0,461	0,410	0,193	0,214	0,110	0,092	0,080	0,044
1,5	0,426	0,673	1,052	1,873	2,083	2,964	2,831	3,840	2,929	2,252	2,544	1,655	1,638	0,817	0,635	0,368	0,267
2	0,030	0,145	0,314	0,629	0,976	1,648	1,606	1,946	1,610	1,962	3,087	2,484	2,892	1,963	1,659	0,972	0,594
2,5	0	0,005	0,030	0,099	0,160	0,337	0,456	0,576	0,558	0,709	1,023	1,247	1,958	1,895	2,038	1,569	0,872
3	0	0,001	0,001	0,011	0,033	0,072	0,132	0,209	0,201	0,293	0,363	0,376	0,665	0,931	1,194	1,313	1,053
3,5	0	0	0	0,001	0,004	0,031	0,047	0,086	0,091	0,111	0,128	0,181	0,198	0,212	0,429	0,545	0,526
4	0	0	0	0	0	0,004	0,015	0,037	0,051	0,067	0,084	0,103	0,135	0,094	0,106	0,196	0,202
4,5	0	0	0	0	0	0	0,002	0,009	0,018	0,032	0,028	0,052	0,075	0,066	0,057	0,064	0,086
5	0	0	0	0	0	0	0,001	0,001	0,001	0,012	0,017	0,026	0,039	0,040	0,030	0,040	0,031
5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,005	0,011	0,012	0,009	0,019	0,016	0,019	0,012
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,002	0,003	0,003	0,010	0,008	0,007	0,011
6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,002	0,002	0,005	0,004	0,009	0,008
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001

Tabla de encuentros del punto 8 (%t) para trabajar con Pelamis

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,74	1,16	2,04	2,70	4,45	3,38	3,82	2,13	1,29	1,04	0,44	0,43	0,20	0	0	0
1,5	1,19	2,95	5,99	12,47	15,14	22,33	21,33	27,92	20,01	14,21	14,49	8,55	7,60	3,36	2,34	1,19	0,77
2	0,15	1,12	3,16	7,49	12,66	22,09	21,38	25,06	19,46	21,83	31,36	22,63	23,56	14,27	10,75	5,62	3,07
2,5	0	0,06	0,47	1,84	3,23	7,02	9,51	11,60	10,56	12,36	16,22	17,81	25,04	21,58	20,71	14,15	7,03
3	0	0,01	0,02	0,29	0,95	2,13	3,85	5,75	5,13	6,84	7,64	7,21	12,24	15,34	17,47	17,13	12,18
3,5	0	0	0	0,03	0,15	1,20	1,76	3,06	3,01	3,53	3,67	4,62	4,50	4,28	8,09	9,64	8,29
4	0	0	0	0	0	0,19	0,69	1,63	2,14	2,51	2,83	3,32	4,02	2,48	3,40	4,07	3,77
4,5	0	0	0	0	0	0	0,09	0,48	0,88	1,48	1,16	1,97	2,50	2,06	1,68	1,68	1,99
5	0	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,05	0,62	0,84	1,21	1,61	1,48	0,98	1,23	0,89
5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10	0,27	0,63	0,64	0,43	0,81	0,64	0,67	0,36
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,15	0,17	0,17	0,49	0,35	0,29	0,40
6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10	0,15	0,13	0,25	0,20	0,38	0,33
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10	0,15	0,14	0,08	0,04	0,04

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 8 (MWh) para trabajar con Pelamis

ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,399	0,851	1,526	2,363	1,877	0,871	0,412	0,202	0,124	0,056	0,030	0,010	0,006
2	0,455	2,183	5,561	9,050	10,324	9,846	8,668	5,074	2,200	0,955	0,549	0,237	0,130
3	0	0,036	0,302	0,997	1,543	2,389	4,246	6,058	4,807	2,313	1,127	0,440	0,192
4	0	0	0,005	0,097	0,266	0,391	0,617	0,842	1,469	1,944	1,179	0,411	0,196
5	0	0	0	0,002	0,029	0,089	0,192	0,194	0,221	0,474	0,573	0,394	0,282
6	0	0	0	0	0,002	0,019	0,028	0,053	0,049	0,094	0,169	0,117	0,207
7	0	0	0	0	0	0,002	0,009	0,012	0,018	0,023	0,063	0,042	0,085

Tabla de encuentros del punto 8 (%t) para trabajar con Wave Dragon

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	5,59	18,64	48,12	74,52	59,21	27,46	12,98	6,36	3,47	1,37	0,65	0,19	0,10
2	25,52	133,88	409,18	713,47	1076,22	1026,34	903,62	528,90	206,24	79,45	39,94	14,76	6,72
3	0	4,55	42,58	152,79	270,31	548,22	974,48	1390,38	993,75	425,53	181,59	60,46	22,05
4	0	0	1,16	27,43	86,48	143,70	287,54	392,33	570,06	669,12	355,21	106,16	42,25
5	0	0	0	0,94	13,42	46,78	117,85	118,80	131,43	252,78	263,72	136,23	81,65
6	0	0	0	0	0,92	11,45	17,18	32,44	30,06	57,73	101,46	52,59	76,15
7	0	0	0	0	0	0,95	5,25	7,63	10,97	13,84	38,65	24,48	42,64

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 8 (MWh) para trabajar con Wave Dragon

ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0,009	0	0,002	0,006	0,007	0,002	0,003	0	0	0	0,004	0,001	0	0	0	0
1	0,417	0,300	0,356	0,523	0,670	1,146	0,878	0,988	0,562	0,402	0,356	0,174	0,191	0,107	0,082	0,079	0,041
1,5	0,938	1,187	1,122	1,635	1,676	2,485	2,543	3,416	2,616	2,045	2,272	1,509	1,555	0,843	0,636	0,368	0,292
2	0,076	0,608	1,022	1,370	1,372	1,610	1,372	1,877	1,484	1,849	2,764	2,224	2,627	1,834	1,713	1,003	0,668
2,5	0,001	0,024	0,140	0,356	0,375	0,529	0,522	0,622	0,494	0,665	1,037	1,254	1,884	1,761	1,886	1,569	0,962
3	0	0,002	0,012	0,058	0,095	0,168	0,180	0,194	0,210	0,261	0,344	0,366	0,655	0,926	1,180	1,313	1,020
3,5	0	0	0	0,007	0,028	0,066	0,098	0,099	0,089	0,076	0,107	0,157	0,195	0,249	0,444	0,578	0,537
4	0	0	0	0,002	0,003	0,023	0,044	0,068	0,047	0,055	0,066	0,085	0,116	0,100	0,108	0,199	0,217
4,5	0	0	0	0	0	0,002	0,020	0,029	0,030	0,044	0,029	0,041	0,065	0,058	0,051	0,068	0,078
5	0	0	0	0	0	0	0,003	0,016	0,013	0,023	0,020	0,020	0,030	0,040	0,027	0,033	0,037
5,5	0	0	0	0	0	0,001	0	0,003	0,002	0,013	0,015	0,011	0,009	0,012	0,014	0,016	0,017
6	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,005	0,007	0,006	0,005	0,003	0,011	0,009	0,012	0,010
6,5	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0,006	0,002	0,002	0,002	0,005	0,002	0,006	0,001
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,001	0,001	0,004	0,002	0	0,003	0,001

Tabla de encuentros del punto 9 (%t) para trabajar con Pelamis

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,58	0,90	1,56	2,17	3,82	2,92	3,20	1,72	1,13	0,91	0,40	0,39	0,20	0	0	0
1,5	2,63	5,20	6,39	10,88	12,19	18,72	19,16	24,84	17,87	12,90	12,94	7,80	7,22	3,47	2,34	1,19	0,84
2	0,38	4,68	10,30	16,32	17,78	21,58	18,28	24,18	17,94	20,57	28,08	20,26	21,40	13,33	11,10	5,80	3,45
2,5	0,01	0,29	2,21	6,60	7,59	11,03	10,88	12,53	9,35	11,60	16,44	17,91	24,10	20,05	19,16	14,15	7,75
3	0	0,04	0,27	1,54	2,76	5,01	5,23	5,35	5,37	6,09	7,23	7,03	12,05	15,25	17,26	17,13	11,79
3,5	0	0	0	0,25	1,07	2,55	3,64	3,50	2,93	2,42	3,04	4,02	4,43	5,02	8,37	10,23	8,47
4	0	0	0	0,07	0,15	1,08	2,06	2,96	1,97	2,08	2,22	2,72	3,44	2,65	3,48	4,14	4,05
4,5	0	0	0	0	0	0,13	1,11	1,49	1,49	2,05	1,19	1,56	2,19	1,80	1,50	1,78	1,81
5	0	0	0	0	0	0	0,19	0,94	0,78	1,24	0,99	0,92	1,25	1,45	0,88	1,02	1,05
5,5	0	0	0	0	0	0,05	0	0,20	0,15	0,77	0,85	0,56	0,40	0,51	0,55	0,57	0,53
6	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,36	0,46	0,39	0,30	0,17	0,53	0,38	0,51	0,37
6,5	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0	0,41	0,10	0,15	0,13	0,25	0,12	0,28	0,03
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10	0,05	0,05	0,26	0,14	0	0,16	0,04

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 9 (MWh) para trabajar con Pelamis

ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,417	0,665	1,201	2,033	1,553	0,759	0,370	0,189	0,120	0,060	0,023	0,009	0,006
2	1,015	3,939	6,053	8,010	9,394	8,929	7,914	5,025	2,331	1,060	0,614	0,247	0,147
3	0,001	0,178	0,883	1,399	1,520	2,308	4,160	5,752	4,863	2,414	1,224	0,503	0,216
4	0	0	0,040	0,231	0,303	0,304	0,552	0,902	1,531	2,045	1,254	0,451	0,200
5	0	0	0	0,026	0,088	0,117	0,157	0,175	0,216	0,501	0,625	0,443	0,266
6	0	0	0	0,001	0,012	0,041	0,028	0,045	0,056	0,100	0,195	0,144	0,228
7	0	0	0	0	0,001	0,010	0,009	0,009	0,011	0,025	0,065	0,048	0,111

Tabla de encuentros del punto 9 (%t) para trabajar con Wave Dragon

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	5,85	14,57	37,88	64,11	48,98	23,92	11,66	5,96	3,36	1,47	0,51	0,18	0,10
2	56,88	241,51	445,37	631,52	979,22	930,79	825,03	523,88	218,50	88,25	44,63	15,39	7,60
3	0	22,63	124,55	214,46	266,22	529,65	954,83	1320,20	1005,33	443,99	197,27	69,13	24,73
4	0	0	9,87	65,18	98,36	111,93	257,45	420,25	594,22	703,94	377,95	116,62	43,09
5	0	0	0	10,37	40,97	61,55	96,38	107,35	128,19	267,31	287,34	153,19	76,92
6	0	0	0	0	6,87	25,29	17,18	27,67	34,35	61,07	116,89	64,43	83,88
7	0	0	0	0	0	6,20	5,73	5,73	6,68	15,27	39,60	28,10	55,95

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 9 (MWh) para trabajar con Wave Dragon

ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0,005	0	0,002	0,005	0	0	0	0	0	0	0,002	0	0	0	0	0
1	0,321	0,193	0,269	0,363	0,480	0,854	0,661	0,750	0,438	0,297	0,300	0,157	0,162	0,086	0,058	0,056	0,032
1,5	1,487	1,323	0,692	0,947	1,173	1,905	2,021	2,684	2,084	1,702	1,906	1,295	1,315	0,745	0,573	0,312	0,261
2	0,209	1,726	2,329	1,893	1,344	1,248	1,149	1,782	1,422	1,632	2,312	1,967	2,347	1,651	1,589	0,966	0,605
2,5	0	0,124	0,909	1,801	0,984	0,824	0,621	0,669	0,522	0,696	1,178	1,327	1,817	1,660	1,741	1,433	0,921
3	0	0,004	0,081	0,445	0,426	0,381	0,266	0,293	0,223	0,286	0,358	0,451	0,798	0,985	1,208	1,253	0,995
3,5	0	0,001	0,002	0,050	0,131	0,239	0,165	0,141	0,101	0,094	0,140	0,182	0,281	0,366	0,587	0,712	0,587
4	0	0	0,001	0,005	0,024	0,062	0,100	0,092	0,058	0,053	0,072	0,077	0,127	0,114	0,180	0,253	0,265
4,5	0	0	0	0,001	0,002	0,009	0,040	0,049	0,025	0,037	0,040	0,043	0,066	0,060	0,050	0,085	0,090
5	0	0	0	0	0	0,002	0,006	0,013	0,026	0,019	0,023	0,021	0,037	0,034	0,028	0,035	0,045
5,5	0	0	0	0	0	0	0,002	0,009	0,009	0,019	0,014	0,012	0,009	0,018	0,010	0,016	0,019
6	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,005	0,005	0,005	0,007	0,006	0,010	0,010	0,010	0,013
6,5	0	0	0	0	0	0	0,002	0	0,002	0,004	0,002	0,001	0,003	0,005	0,004	0,004	0,003
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,002	0,001	0,003	0,002	0	0,002

Tabla de encuentros del punto 10 (%t) para trabajar con Pelamis

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,37	0,68	1,08	1,56	2,84	2,20	2,43	1,34	0,83	0,76	0,36	0,33	0,16	0	0	0
1,5	4,17	5,79	3,94	6,30	8,53	14,36	15,23	19,52	14,24	10,74	10,85	6,70	6,10	3,07	2,11	1,01	0,76
2	1,05	13,30	23,46	22,55	17,43	16,73	15,30	22,94	17,19	18,15	23,50	17,92	19,12	12,00	10,30	5,58	3,13
2,5	0	1,50	14,33	33,45	19,92	17,18	12,94	13,48	9,88	12,13	18,68	18,94	23,24	18,91	17,69	12,93	7,42
3	0	0,07	1,84	11,89	12,40	11,36	7,74	8,07	5,71	6,65	7,52	8,66	14,69	16,22	17,68	16,35	11,51
3,5	0	0,02	0,07	1,81	5,02	9,21	6,13	4,98	3,34	2,99	4,00	4,66	6,40	7,38	11,05	12,60	9,25
4	0	0	0,03	0,21	1,14	2,98	4,62	4,01	2,43	1,99	2,41	2,47	3,77	3,02	5,78	5,25	4,94
4,5	0	0	0	0,04	0,09	0,53	2,23	2,53	1,23	1,69	1,64	1,62	2,21	1,87	1,47	2,23	2,10
5	0	0	0	0	0	0,15	0,39	0,80	1,51	0,99	1,10	0,96	1,54	1,25	0,91	1,07	1,30
5,5	0	0	0	0	0	0	0,15	0,56	0,60	1,09	0,81	0,64	0,40	0,78	0,40	0,54	0,60
6	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,36	0,36	0,34	0,39	0,34	0,49	0,45	0,42	0,48
6,5	0	0	0	0	0	0	0,10	0	0,10	0,26	0,15	0,05	0,18	0,25	0,20	0,17	0,13
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,15	0,05	0,18	0,08	0	0,07

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 10 (MWh) para trabajar con Pelamis

ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,321	0,467	0,850	1,514	1,188	0,598	0,321	0,143	0,088	0,046	0,019	0,009	0,005
2	1,696	6,069	5,358	6,324	7,973	7,553	6,925	4,557	2,144	0,992	0,531	0,217	0,137
3	0	1,117	3,657	2,092	1,707	2,517	4,393	5,594	4,602	2,282	1,182	0,482	0,201
4	0	0,004	0,209	0,566	0,392	0,359	0,667	1,247	1,816	2,109	1,247	0,437	0,212
5	0	0	0,002	0,058	0,113	0,117	0,167	0,172	0,255	0,553	0,667	0,429	0,273
6	0	0	0	0,002	0,024	0,044	0,034	0,048	0,058	0,111	0,204	0,165	0,220
7	0	0	0	0,002	0,002	0,007	0,007	0,013	0,009	0,023	0,058	0,047	0,100

Tabla de encuentros del punto 10 (%t) para trabajar con Wave Dragon

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	4,50	10,22	26,82	47,75	37,47	18,84	10,13	4,51	2,46	1,13	0,43	0,16	0,09
2	95,09	372,14	394,24	498,59	831,11	787,31	721,86	475,05	200,99	82,56	38,58	13,50	7,08
3	0	141,92	515,75	320,73	299,08	577,69	1008,23	1283,95	951,44	419,81	190,50	66,24	23,04
4	0	0	52,07	159,55	127,44	131,97	310,75	581,25	704,73	725,90	375,84	113,00	45,77
5	0	0	0	23,57	52,58	61,96	102,58	105,44	151,80	295,12	306,66	148,34	78,95
6	0	0	0	0	14,20	26,72	20,99	29,58	35,78	68,23	122,50	73,84	81,01
7	0	0	0	0	0	4,29	4,29	8,11	5,25	14,31	35,31	27,20	50,47

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 10 (MWh) para trabajar con Wave Dragon

ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0,001	0	0,002	0,002	0	0	0	0	0	0	0,002	0,001	0	0	0	0
1	0,339	0,210	0,260	0,328	0,479	0,856	0,722	0,766	0,507	0,343	0,357	0,174	0,188	0,085	0,076	0,075	0,040
1,5	1,030	1,554	1,050	1,064	1,229	1,850	2,002	2,730	2,205	1,716	2,055	1,358	1,433	0,812	0,610	0,337	0,272
2	0,103	1,014	2,294	2,492	1,583	1,346	1,057	1,711	1,390	1,702	2,423	2,045	2,477	1,730	1,649	0,991	0,624
2,5	0,002	0,037	0,447	1,715	1,153	0,938	0,613	0,636	0,501	0,678	1,165	1,316	1,826	1,692	1,781	1,475	0,899
3	0	0,002	0,017	0,222	0,345	0,437	0,268	0,289	0,220	0,247	0,342	0,467	0,789	0,994	1,194	1,227	0,956
3,5	0	0	0,001	0,020	0,061	0,185	0,174	0,145	0,098	0,103	0,134	0,169	0,284	0,330	0,549	0,675	0,585
4	0	0	0,001	0,001	0,003	0,047	0,064	0,082	0,047	0,053	0,065	0,070	0,119	0,117	0,156	0,240	0,240
4,5	0	0	0	0	0	0,002	0,009	0,025	0,027	0,030	0,031	0,046	0,063	0,062	0,052	0,077	0,086
5	0	0	0	0	0	0	0,002	0,009	0,015	0,018	0,012	0,019	0,028	0,024	0,030	0,025	0,040
5,5	0	0	0	0	0	0	0,001	0,003	0,005	0,012	0,006	0,010	0,011	0,016	0,011	0,015	0,016
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,002	0,002	0,003	0,004	0,006	0,005	0,012	0,010
6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,001	0,002	0,001	0,003	0,008	0,002	0,002	0,004
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0	0,003

Tabla de encuentros del punto 11 (%t) para trabajar con Pelamis

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,40	0,66	0,98	1,55	2,85	2,40	2,48	1,56	0,96	0,91	0,40	0,38	0,16	0	0	0
1,5	2,89	6,81	5,98	7,09	8,93	13,94	15,08	19,85	15,07	10,82	11,70	7,02	6,65	3,34	2,24	1,09	0,79
2	0,51	7,82	23,11	29,69	20,53	18,04	14,07	22,03	16,80	18,94	24,62	18,63	20,18	12,58	10,69	5,73	3,23
2,5	0,01	0,45	7,04	31,85	23,33	19,56	12,78	12,81	9,48	11,81	18,47	18,80	23,36	19,27	18,10	13,31	7,25
3	0	0,03	0,39	5,92	10,02	13,02	7,78	7,97	5,63	5,75	7,20	8,96	14,51	16,38	17,46	16,02	11,06
3,5	0	0	0,02	0,74	2,33	7,14	6,44	5,15	3,24	3,28	3,82	4,32	6,47	6,65	10,35	11,94	9,23
4	0	0	0,03	0,03	0,15	2,27	2,96	3,57	1,94	1,99	2,17	2,25	3,54	3,08	5,00	4,98	4,49
4,5	0	0	0	0	0	0,09	0,51	1,29	1,34	1,37	1,29	1,74	2,11	1,94	1,54	2,02	1,99
5	0	0	0	0	0	0	0,10	0,52	0,87	0,95	0,61	0,85	1,16	0,88	0,98	0,76	1,14
5,5	0	0	0	0	0	0	0,05	0,20	0,30	0,68	0,36	0,52	0,51	0,71	0,43	0,51	0,48
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,15	0,15	0,17	0,21	0,30	0,21	0,48	0,37
6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,15	0,05	0,18	0,42	0,08	0,07	0,16
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,09	0,08	0	0,14

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 11 (MWh) para trabajar con Pelamis



ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,339	0,471	0,812	1,578	1,273	0,700	0,365	0,161	0,116	0,064	0,019	0,010	0,007
2	1,133	5,911	6,368	6,255	8,036	7,896	7,313	4,801	2,224	1,004	0,577	0,232	0,135
3	0,002	0,503	3,434	2,256	1,646	2,431	4,398	5,661	4,558	2,284	1,184	0,497	0,215
4	0	0,002	0,085	0,470	0,372	0,355	0,642	1,152	1,740	2,010	1,247	0,446	0,219
5	0	0	0	0,012	0,075	0,091	0,156	0,169	0,227	0,493	0,612	0,410	0,275
6	0	0	0	0,001	0,009	0,023	0,028	0,038	0,052	0,103	0,182	0,144	0,217
7	0	0	0	0	0,001	0,005	0,005	0,012	0,009	0,015	0,040	0,042	0,081

Tabla de encuentros del punto 11 (%t) para trabajar con Wave Dragon

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	4,75	10,31	25,59	49,76	40,14	22,08	11,51	5,08	3,25	1,56	0,43	0,19	0,11
2	63,51	362,46	468,61	493,13	837,68	823,08	762,33	500,44	208,50	83,59	41,98	14,42	7,00
3	0	63,84	484,37	345,90	288,31	558,04	1009,48	1299,30	942,28	420,23	190,87	68,38	24,64
4	0	0	21,10	132,56	120,87	130,54	299,15	536,65	675,14	691,88	375,84	115,21	47,11
5	0	0	0	5,03	35,17	48,01	95,42	103,53	135,14	262,75	281,61	141,88	79,62
6	0	0	0	0	5,04	13,84	17,18	23,38	31,97	62,98	109,41	64,43	79,87
7	0	0	0	0	0	2,86	3,34	7,63	5,25	9,07	24,81	24,48	40,69

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 11 (MWh) para trabajar con Wave Dragon

ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0,002	0	0,002	0,001	0,002	0	0	0	0	0	0,002	0,002	0	0	0	0
1	0,298	0,357	0,331	0,387	0,526	0,940	0,821	0,859	0,580	0,412	0,422	0,206	0,211	0,093	0,089	0,089	0,047
1,5	0,338	1,225	1,672	1,868	1,689	2,013	2,077	2,968	2,350	1,895	2,248	1,482	1,583	0,882	0,737	0,379	0,317
2	0,010	0,229	1,113	2,604	2,431	2,015	1,168	1,576	1,301	1,699	2,465	2,186	2,598	1,856	1,702	1,095	0,680
2,5	0	0,002	0,066	0,575	0,962	1,166	0,774	0,654	0,492	0,628	1,046	1,158	1,775	1,689	1,762	1,542	0,948
3	0	0	0,002	0,030	0,104	0,285	0,303	0,342	0,222	0,216	0,304	0,433	0,675	0,874	1,157	1,197	0,973
3,5	0	0	0	0,001	0,005	0,045	0,093	0,159	0,126	0,100	0,124	0,135	0,254	0,268	0,420	0,586	0,524
4	0	0	0	0	0	0,002	0,015	0,033	0,043	0,045	0,062	0,060	0,100	0,107	0,128	0,195	0,211
4,5	0	0	0	0	0	0	0,001	0,005	0,009	0,023	0,016	0,030	0,048	0,054	0,051	0,067	0,063
5	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0,008	0,008	0,005	0,014	0,018	0,023	0,019	0,031
5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,002	0,003	0,003	0,009	0,007	0,015	0,009
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,003	0,006	0,002	0,005	0,005
6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0,001	0,001	0,004	0	0,001	0,004
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0	0	0,001	0,001	0,001	0,001

Tabla de encuentros del punto 12 (%t) para trabajar con Pelamis

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,69	0,84	1,15	1,70	3,13	2,73	2,78	1,78	1,15	1,07	0,47	0,42	0,17	0	0	0
1,5	0,95	5,36	9,52	12,44	12,28	15,16	15,65	21,58	16,06	11,95	12,80	7,66	7,35	3,63	2,71	1,23	0,92
2	0,05	1,76	11,21	31,02	31,51	27,01	15,55	20,30	15,73	18,90	25,05	19,91	21,16	13,49	11,03	6,33	3,51
2,5	0	0,02	1,04	10,68	19,46	24,32	16,14	13,17	9,30	10,95	16,58	16,53	22,70	19,24	17,90	13,91	7,64
3	0	0	0,04	0,79	3,03	8,48	8,80	9,45	5,67	5,02	6,40	8,31	12,42	14,39	16,93	15,62	11,25
3,5	0	0	0	0,03	0,18	1,74	3,47	5,62	4,16	3,16	3,53	3,46	5,78	5,39	7,91	10,37	8,26
4	0	0	0	0	0	0,07	0,69	1,46	1,78	1,70	2,09	1,92	2,98	2,81	4,10	4,04	3,93
4,5	0	0	0	0	0	0	0,04	0,24	0,46	1,04	0,68	1,12	1,61	1,70	1,52	1,76	1,47
5	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0	0,41	0,38	0,25	0,58	0,65	0,75	0,59	0,89
5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,18	0,09	0,16	0,14	0,37	0,27	0,51	0,29
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,17	0,30	0,10	0,22	0,17
6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0	0,05	0,04	0,21	0	0,03	0,16
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0	0	0	0,05	0,04	0,04	0,04

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 12 (MWh) para trabajar con Pelamis

ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,298	0,690	0,916	1,762	1,439	0,833	0,420	0,183	0,136	0,075	0,026	0,016	0,007
2	0,349	4,238	8,592	7,273	8,195	8,307	7,849	5,176	2,471	1,092	0,678	0,258	0,162
3	0	0,069	1,670	2,528	1,709	2,193	4,041	5,481	4,659	2,454	1,256	0,551	0,241
4	0	0	0,005	0,155	0,361	0,331	0,549	0,922	1,515	1,915	1,330	0,481	0,226
5	0	0	0	0,001	0,015	0,054	0,097	0,147	0,181	0,407	0,586	0,399	0,282
6	0	0	0	0	0	0,005	0,010	0,024	0,034	0,068	0,155	0,142	0,212
7	0	0	0	0	0	0,002	0,002	0,005	0,006	0,018	0,034	0,030	0,091

Tablas de encuentros del punto 12 (%t) para trabajar con Wave Dragon

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	4,18	15,11	28,88	55,58	45,39	26,28	13,25	5,77	3,82	1,83	0,58	0,30	0,11
2	19,54	259,88	632,24	573,43	854,31	865,91	818,22	539,61	231,62	90,84	49,27	16,02	8,36
3	0	8,80	235,60	387,53	299,49	503,40	927,51	1258,05	963,19	451,44	202,41	75,76	27,68
4	0	0	1,35	43,67	117,33	121,66	256,00	429,68	587,88	659,21	400,93	124,26	48,62
5	0	0	0	0,31	6,89	28,72	59,64	90,17	107,37	217,09	269,45	138,11	81,65
6	0	0	0	0	0	2,86	6,20	14,79	20,99	41,51	93,05	63,74	78,15
7	0	0	0	0	0	0,95	0,95	3,34	3,82	10,97	20,99	17,22	45,77

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 12 (MWh) para trabajar con Wave Dragon

ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,261	0,332	0,374	0,422	0,544	0,879	0,824	0,801	0,539	0,426	0,420	0,195	0,229	0,104	0,102	0,082	0,054
1,5	0,190	0,724	1,679	2,659	2,184	2,281	2,062	2,732	2,232	1,886	2,269	1,607	1,624	0,927	0,760	0,390	0,354
2	0,027	0,066	0,353	1,767	2,719	3,636	1,813	1,309	1,094	1,401	2,210	2,083	2,633	2,062	1,802	1,166	0,743
2,5	0,002	0,009	0,016	0,141	0,556	1,509	1,853	0,917	0,486	0,463	0,784	0,924	1,516	1,554	1,711	1,583	0,976
3	0	0	0,002	0,003	0,036	0,187	0,588	0,671	0,377	0,284	0,259	0,345	0,592	0,692	0,965	1,074	0,889
3,5	0	0	0	0,001	0,002	0,011	0,110	0,234	0,255	0,158	0,113	0,105	0,195	0,209	0,332	0,455	0,444
4	0	0	0	0	0	0,001	0,016	0,063	0,107	0,109	0,061	0,068	0,089	0,085	0,122	0,173	0,152
4,5	0	0	0	0	0	0	0,001	0,009	0,025	0,049	0,028	0,026	0,024	0,039	0,032	0,048	0,061
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,005	0,010	0,009	0,013	0,019	0,013	0,012	0,023
5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,009	0,001	0,006	0,003	0,012	0,011
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,003	0,003	0,001	0,003	0,005
6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,001

Tabla de encuentros del punto 15 (%t) para trabajar con Pelamis

Hs (m)	Te (s)																
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,64	0,95	1,26	1,76	2,93	2,74	2,60	1,65	1,20	1,07	0,44	0,46	0,19	0	0	0
1,5	0,53	3,17	9,56	17,71	15,88	17,19	15,53	19,86	15,25	11,90	12,92	8,31	7,54	3,82	2,80	1,26	1,02
2	0,14	0,51	3,56	21,05	35,26	48,73	24,14	16,85	13,22	15,59	22,46	18,98	21,45	14,99	11,68	6,74	3,84
2,5	0,01	0,10	0,25	2,62	11,26	31,45	38,62	18,47	9,20	8,07	12,44	13,19	19,39	17,69	17,39	14,28	7,86
3	0	0	0,04	0,08	1,04	5,56	17,11	18,51	9,65	6,62	5,45	6,61	10,89	11,39	14,11	14,01	10,27
3,5	0	0	0	0,03	0,06	0,42	4,07	8,29	8,43	5,01	3,22	2,69	4,43	4,22	6,26	8,05	7,01
4	0	0	0	0	0	0,04	0,72	2,75	4,44	4,09	2,04	2,20	2,63	2,24	3,93	3,59	2,85
4,5	0	0	0	0	0	0	0,04	0,44	1,23	2,27	1,16	1,00	0,81	1,21	0,94	1,27	1,41
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09	0,29	0,49	0,39	0,55	0,68	0,43	0,36	0,65
5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,13	0,44	0,04	0,27	0,12	0,43	0,34
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,17	0,15	0,03	0,13	0,17
6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 15 (MWh) para trabajar con Pelamis

ANEJO 1. TABLAS DE ENCUENTROS Y APORTES ENERGÉTICOS DE LOS PUNTOS SELECCIONADOS

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,261	0,709	0,966	1,703	1,341	0,847	0,424	0,206	0,135	0,077	0,031	0,012	0,007
2	0,217	2,823	9,330	9,792	7,367	7,767	7,947	5,551	2,652	1,217	0,741	0,284	0,177
3	0,002	0,026	0,736	4,136	2,451	1,790	3,377	4,921	4,521	2,547	1,253	0,563	0,254
4	0	0	0,002	0,137	0,659	0,440	0,457	0,748	1,225	1,708	1,274	0,498	0,229
5	0	0	0	0,001	0,035	0,093	0,072	0,103	0,143	0,328	0,500	0,360	0,284
6	0	0	0	0	0	0,002	0,013	0,013	0,031	0,044	0,124	0,126	0,183
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,011	0,019	0,019	0,077

Tablas de encuentros del punto 15 (%t) para trabajar con Wave Dragon

Hs (m)	Te (s)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	3,66	15,52	30,47	53,71	42,28	26,70	13,37	6,50	3,80	1,89	0,68	0,22	0,11
2	12,17	173,09	686,52	771,99	767,93	809,62	828,44	578,62	248,61	101,27	53,91	17,66	9,17
3	0	3,26	103,81	634,07	429,40	410,90	775,01	1129,48	934,55	468,61	202,04	77,47	29,11
4	0	0	0,58	38,63	214,18	162,03	212,85	348,82	475,25	587,95	383,82	128,68	49,29
5	0	0	0	0,31	16,32	48,83	44,37	62,98	85,15	174,75	230,08	124,65	82,10
6	0	0	0	0	0	1,43	8,11	8,11	19,08	26,72	74,81	56,42	67,27
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1,43	6,68	11,45	11,33	38,73

Aporte energético de cada rango (H<sub>s</sub>-T<sub>e</sub>) del punto 15 (MWh) para trabajar con Wave Dragon