

Proyecto: **Plan de desarrollo regional para el uso de la energía proveniente del oleaje atlántico**



Fecha: 15/01/07  
25/02/07

Autor: Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, SA (ITER, SA)

**Con la participación de la Unión Europea.  
Proyecto cofinanciado por el FEDER**



ESPAÑA ESPACIO ATLÁNTICO  
FRANCE ESPACE ATLANTIQUE  
IRELAND ATLANTIC AREA  
PORTUGAL ESPACO ATLÁNTICO  
U.K. ATLANTIC AREA

## **TAREA I.2**

### **ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE EN CUANTO A SISTEMAS DE GENERACIÓN UNDIMOTRIZ EXISTENTES**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b><i>Introducción</i></b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b><i>Las olas como recurso energético</i></b>	<b>2</b>
2.1	<b>Tipos de ondas oceánicas</b>	<b>2</b>
2.2	<b>Definición y descripción básica de las olas oceánicas</b>	<b>3</b>
2.2.1	Ondas de gravedad	3
2.2.2	Oleaje	4
2.2.3	Onda sinusoidal simple	4
2.2.4	Movimiento de la onda sinusoidal simple	5
2.3	<b>Energía de la ola</b>	<b>7</b>
2.4	<b>Potencia de la ola</b>	<b>8</b>
2.4.1	Oleaje real	8
2.5	<b>Modificación de la energía de las olas</b>	<b>9</b>
2.6	<b>Olas catastróficas</b>	<b>9</b>
2.6.1	Marejadas	10
2.6.2	Tsunamis	10
2.6.3	Ondas estacionarias	10
<b>3</b>	<b><i>Aprovechamiento de la energía undimotriz</i></b>	<b>11</b>
3.1	<b>Energía undimotriz</b>	<b>11</b>
3.2	<b>Recursos energéticos</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b><i>Sistemas de aprovechamiento energético</i></b>	<b>15</b>
4.1	<b>GEO</b>	<b>15</b>
4.2	<b>Clasificación de los GEO</b>	<b>16</b>
4.2.1	Técnicas de utilización energética del oleaje	16
4.3	<b>Tipos</b>	<b>16</b>
4.3.1	Totalizadores o terminadores	17
4.3.2	Atenuadores	22
4.3.3	Absorbedores puntuales	25
<b>5</b>	<b><i>Impacto ambiental</i></b>	<b>30</b>
5.1	<b>Morfología oceánica</b>	<b>30</b>
5.1.1	El margen continental	30
5.1.2	Morfología del litoral	30
5.2	<b>Los sedimentos oceánicos</b>	<b>31</b>
5.2.1	Dinámica sedimentaria	32
5.3	<b>Impactos ambientales sobre el medio marino</b>	<b>34</b>
5.3.1	Impacto sobre la vida del litoral	35
5.3.2	Impacto sobre la vida en el mar	35
5.3.3	Impacto sobre la morfología del litoral	35
5.3.4	Otros impactos	35
5.4	<b>Caracterización del impacto</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b><i>Estado actual y perspectivas de futuro</i></b>	<b>37</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el océano representa para la humanidad la mayor fuente de recursos naturales sobre el planeta; entendiéndose como tales todos los materiales químicos, componentes geológicos, suelo, agua, seres vivos, asociaciones biológicas y poblaciones humanas que forman parte de la naturaleza y que brindan al hombre posibilidades de vida y bienestar, y que son fundamentales para establecer la riqueza de la economía de un país.



**Figura 1.1.** El mar, a la vez un espacio a preservar y un recurso a utilizar; lugar de ocio; de trabajo para el pescador; de estudio para el científico; y de vida para la flora y fauna terrestre y marina.

A finales del siglo XIX, como consecuencia del aumento de la población humana y del desarrollo industrial, los recursos terrestres empezaron a disminuir. La humanidad se vio obligada a buscar nuevas fuentes de ellos, pensando en el océano. En aquella época se veía como una reserva ilimitada, debido a que, tanto en las regiones costeras como en mar abierto y en su fondo, cuenta con gran cantidad de recursos pesqueros, energéticos y minerales.



**Figura 1.2.** El océano como recurso energético. Extracción de petróleo en alta mar.

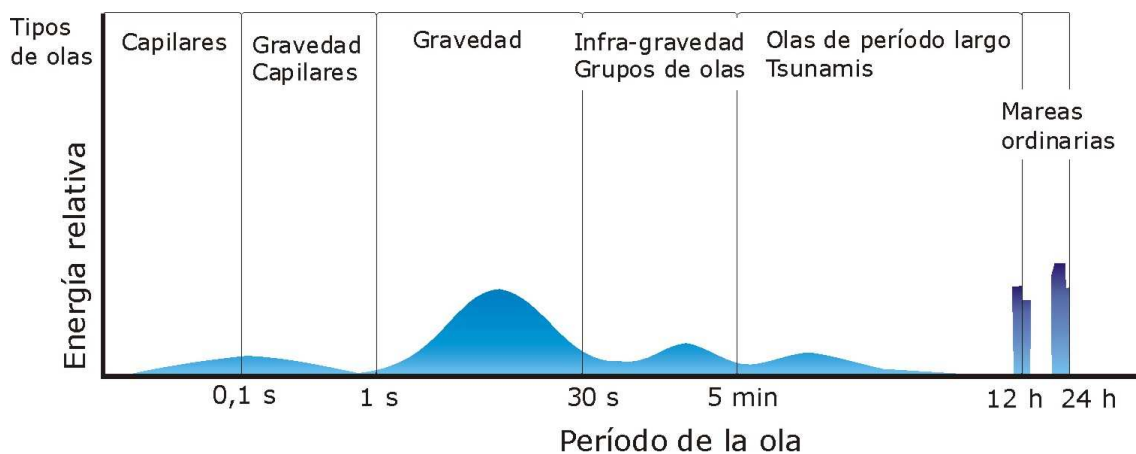
Los recursos pesqueros y los energéticos fueron los primeros en ser explotados. Sin embargo, en los inicios del siglo XX se comenzó a pensar en la utilización de otros recursos marinos como la energía de las mareas y el oleaje, capaz de ser transformada en electricidad. También surgieron varios proyectos que pretendían aprovechar la energía acumulada en forma de calor en las masas de agua oceánica. En la segunda mitad de ese mismo siglo, de forma simultánea al conocimiento teórico, se desarrolló la explotación práctica de estos recursos, construyéndose los primeros mecanismos capaces de aprovecharlos.

## 2 LAS OLAS COMO RECURSO ENERGÉTICO

### 2.1 TIPOS DE ONDAS OCEÁNICAS

En el océano existen muchos tipos de ondas, no solamente las originadas por el viento. Cada tipo tiene su origen y sus particularidades. Centraremos nuestro interés en las ondas generadas por el viento, es decir, en el oleaje.

La energía total transportada por las olas es muchísimo mayor que la de las demás ondas oceánicas. Un análisis espectral global de la energía de las diferentes ondas muestra un esquema como el de la Figura 2.1, donde aparece la energía global de los distintos tipos de ondas en función de sus períodos característicos. Sobre la mayor parte del rango de períodos, el espectro es continuo, mientras que aparece discretizado para los períodos diurno y semidiurno característicos de las mareas.



**Figura 2.1.** Clasificación de las olas oceánicas según el período. Fuente: Munk, 1951

Las ondas producidas por el viento son ondas de gravedad, pues la fuerza restauradora, aquella que tiende a restituir al estado de equilibrio a las partículas de agua desplazadas de su nivel inicial, es la gravedad. Sus períodos oscilan entre 1 y 30 segundos.

Las ondas de mayor frecuencia son las ondas de capilaridad, cuya fuerza restauradora es la tensión superficial. Las ondas más largas, de frecuencia menor, con períodos comprendidos entre 1 y 30 o más minutos, suelen ser en muchas ocasiones responsables de catástrofes marinas, principalmente en las costas.

Estas ondas largas, de período superior a 1 minuto, provocan oscilaciones del agua del mar en lagos, bahías o cuencas semicerradas debido a un efecto de resonancia que se produce cuando la perturbación ondulatoria tiene una velocidad tal que el tiempo necesario para viajar de un extremo a otro de la cuenca es un número entero de períodos de onda. Si la cuenca

tiene unas dimensiones adecuadas la perturbación pueden amplificarse y tener consecuencias desastrosas. Cada cuenca tiene su propio período de oscilación.

Las mareas de tempestad son elevaciones anómalas del nivel del agua del mar debidas al arrastre de agua superficial por vientos que soplan durante un tiempo hacia tierra. Se produce así una desnivelación similar a una ola de período largo (decenas de minutos).

La conjunción de fuertes vientos procedentes de la mar, bajas presiones atmosféricas y mareas astronómicas altas puede provocar aumentos excepcionalmente altos del nivel de las aguas. Estas crecidas pueden causar en las costas y cuencas bajas de los valles inundaciones devastadoras.

Otras ondas oceánicas de desastrosos efectos son los tsunamis, originados por perturbaciones sísmicas del fondo marino. Las ondas formadas tienen períodos entre 10 min y 1 hora y amplitudes típicas del orden de 1 a 10 m, por lo que en aguas profundas pasan apenas desapercibidas. Pero al alcanzar la costa, su velocidad de propagación decrece y aumentan considerablemente su pendiente y su altura, lo que les hace muy peligrosos. No todos los terremotos marinos conllevan la generación de un tsunami, sino sólo aquéllos provocados por movimientos perpendiculares al fondo (elevaciones o hundimientos).

Las ondas de mayor período son las ondas planetarias, asociadas a movimientos oceanográficos a escala sinóptica, y las mareas, originadas por las fuerzas gravitatorias de diversos astros, principalmente del sol y de la luna.

## 2.2 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN BÁSICA DE LAS OLAS OCEÁNICAS

### 2.2.1 *Ondas de gravedad*

Las olas generadas por el viento son denominadas ondas de gravedad, ya que ésta es la fuerza restauradora. La interacción del viento con el mar provoca una transferencia de parte de la energía del viento sobre la superficie marina, que se deforma dando origen a las olas. Además del viento, existen otros factores que influyen en menor medida, como la presión atmosférica, la profundidad, la configuración y tipo de fondo, la temperatura, la salinidad o las corrientes marinas.

La energía cinética del viento es proporcional al cuadrado de su velocidad, por lo que si la velocidad del viento se duplica, la energía eólica se multiplicará por cuatro, y, por tanto, también la altura del oleaje generado, ya que ésta también es proporcional a la energía transferida.

Hay que tener en cuenta que la viscosidad del agua del mar se opone a este proceso de transferencia energética. Para vencer esta oposición y generar ondas apreciables son necesarias velocidades de viento superiores a 5 nudos.

### 2.2.2 Oleaje

La palabra oleaje suele ir asociada a un escenario de ondulaciones de la superficie del agua, a menudo con apariencia de regularidad, que progresan desde la región de formación hacia los contornos oceánicos, es decir, las costas de las islas y continentes. Estas olas son parcialmente atenuadas durante su propagación y finalmente disipadas como rompientes, aunque pueden ser parcialmente reflejadas. No se engloban aquí los movimientos ondulatorios bajo el agua (ondas internas).

La ondulación, que normalmente se aprecia sobre la superficie del mar, suele ser bastante compleja de describir. Antes de considerarla como realmente se observa, utilizaremos como primera aproximación la descripción de un tren de oleaje como una onda sinusoidal simple.

### 2.2.3 Onda sinusoidal simple

Aunque normalmente las olas que se contemplan no guardan mucho parecido con las ondas sinusoidales simples, puede utilizarse la descripción de éstas para describir un tren de oleaje, definido como una serie de crestas de olas suaves, uniformes, paralelas, de igual altura y equidistantes unas de otras, que se mueven a velocidad constante en dirección perpendicular a las crestas y sin cambiar de forma. En realidad, este tipo de oleaje puede aproximarse al caso de un tren de olas de mar de fondo que se propaga en una zona donde el viento está totalmente en calma.

La razón principal para asumir esta simplificación es que siempre es posible hallar un número, generalmente elevado, de ondas sencillas o armónicos, de manera que la combinación de todas ellas produzca la estructura irregular observada.

Por tanto, el estado del mar será el resultado de la superposición de múltiples ondas que se propagan sobre la superficie del agua, cada una según sus propiedades individuales. Así, cada una poseerá una velocidad de propagación y unos elementos que se definen en la Figura 2.2.

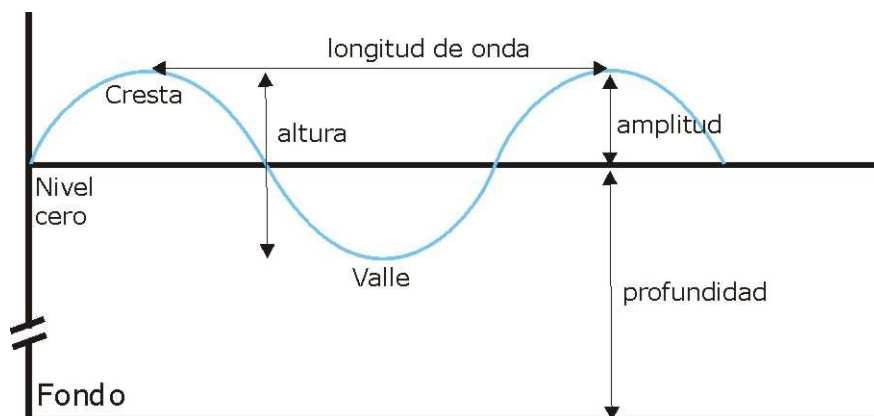


Figura 2.2. Parámetros de la ola.

La *longitud de onda*,  $L$ , es la distancia horizontal entre dos crestas o dos valles sucesivos. El tiempo transcurrido entre el paso de dos crestas o surcos sucesivos es el *período*,  $T$ . La inversa del período es la *frecuencia*,  $f$ , es el número de crestas o senos que pasan por un punto fijo en un segundo.

La *velocidad de fase*,  $c$ , es la relación entre la longitud de onda y el período y representa la velocidad de la onda respecto al agua. Su valor es  $c = L / T$ .

La relación entre la altura de la ola,  $H$ , y la longitud de onda es lo que se conoce como *pendiente* o *escarpadura*.

Atendiendo al período característico, podemos clasificar las olas según:

Período	Longitud de onda	Ondas
$T < 0,2 \text{ s}$	$\sim \text{cm}$	Mar rizada
$0,2 < T < 9 \text{ s}$	$L < 130 \text{ m}$	Mar de viento
$9 < T < 15 \text{ s}$	$L < 350 \text{ m}$	Mar de fondo
$15 < T < 30 \text{ s}$	$L \sim \text{cientos de metros}$	Mar de fondo larga o precursoras
$30 \text{ s} < T < \text{horas}$	$L \sim 10^5 - 10^6 \text{ m}$	Ondas de largo período, tsunamis
12,5 h; 25 h	$L \sim \text{miles de km}$	Mareas

**Tabla 2.1.** Clasificación de las olas oceánicas atendiendo a su período característico.

La altura de las olas suele estar comprendida habitualmente entre 0 y 15 m, aunque puede ser mayor, habiendo constancia de observaciones de olas de 30 metros.

Como en todo movimiento ondulatorio, no hay transporte de masa, sino propagación de energía. Las partículas de agua ejecutan un movimiento circular, pero no se trasladan. Sin embargo, existirá transporte de masa si, además del oleaje, existe una corriente marina de cualquier clase. Los objetos que alcanzan la costa no son transportados por el oleaje, sino por las corrientes marinas, de forma que alcanzan la playa cuando la última cresta rompe contra el litoral.

#### 2.2.4 *Movimiento de la onda sinusoidal simple*

La ecuación que describe el movimiento de las partículas del agua, en la hipótesis del apartado anterior, corresponde a la de una onda unidimensional. Una solución para el desplazamiento de una partícula de agua debido a la propagación del perfil de una onda en la dirección  $x$  es:

$$\eta(x, t) = a \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$$

donde  $\eta$  es el desplazamiento vertical de la partícula;  $a$  la amplitud;  $k$  el número de onda,  $2\pi/L$ ; y  $\omega$  la frecuencia angular,  $2\pi/T$ . La fase de la onda es  $kx - \omega \cdot t$

Como se puede apreciar, el movimiento de la partícula depende de la amplitud de la ola, y su longitud de onda y período. En el caso particular de que se estudie desde una posición fija, por ejemplo una barca fondeada o una plataforma, la solución sería de la forma

$$\eta(x, t) = a \cdot \text{sen}(-\omega t)$$

que sólo depende de la amplitud y el período de la ola.

Las partículas de agua se mueven hacia arriba y hacia abajo, junto con un movimiento hacia delante al paso de la cresta y hacia atrás en el surco o seno, a medida que las olas se desplazan. El movimiento completo es circular (elíptico en aguas poco profundas) en un plano perpendicular a la línea de cresta, llamado movimiento orbital.

Realmente, según sea la inclinación o pendiente de las olas, una partícula de agua no vuelve exactamente al punto de partida de su recorrido anterior, sino que finaliza en una posición ligeramente avanzada en la dirección de propagación. El movimiento de retorno del surco de la ola es ligeramente inferior al movimiento de avance en la cresta de la ola, por lo que el resultado es un pequeño desplazamiento hacia adelante.

El movimiento de las partículas en superficie se transmite hacia el fondo, atenuándose con rapidez al descender. Siendo  $L$  la longitud de onda y  $H$  la altura de la ola, el diámetro de la órbita en función de la profundidad ( $h$ ) será:

$$D(h) = H \cdot e^{-kh} = H \cdot e^{-2\pi h/L} \quad h > 0$$

$$D(0) = H \quad h = 0$$

El diámetro decrece de forma exponencial con la profundidad. Para una profundidad igual a la mitad de la longitud de onda  $D(h=L/2) = H \cdot e^{-\pi}$ , supone sólo el 4% del que hay en superficie.

#### 2.2.4.1 Propagación de las olas

Despreciando la disipación del oleaje por la acción del fondo, a partir de la ecuación del movimiento de la onda sinusoidal, es posible deducir que, para una onda que se propaga en un líquido, la velocidad de fase,  $c$ , depende de la longitud de la onda,  $L$ , y de la profundidad,  $h$ , en la forma

$$c = [(gL/2\pi) \text{tgh}(2\pi h/L)]^{1/2}$$

En el caso de aguas profundas,  $h \gg L$ , y podemos simplificar la ecuación en la forma



$$c = gT / 2\pi$$

Esta consideración puede mantenerse hasta una profundidad mínima de  $h = L / 2$ , o incluso hasta  $h = L / 4$ .

Para el caso de aguas someras, podemos aproximar  $\text{tgh}(2\pi h/L) \approx 2\pi h/L$ , con lo que

$$c = (gh)^{1/2}$$

Es decir, en esta agua, la velocidad sólo es función de la profundidad, disminuyendo cuadráticamente a medida que el oleaje se aproxima a la costa, pasando por aguas menos profundas cada vez.

Aguas profundas (ondas cortas)		Aguas someras (ondas largas)		
$c = 1,56 \cdot T$ $L = 1,56 \cdot T^2$		$c = 3,13 \cdot h^{1/2}$ $L = 3,13 \cdot h^{1/2} \cdot T$		
$T = 5 \text{ s}$ (mar de viento)	$T = 15 \text{ s}$ (mar de fondo)	$h = 5 \text{ m}$	$h = 20 \text{ m}$	$h = 4000 \text{ m}$ (tsunami)
$c = 7,8 \text{ m/s} = 28 \text{ km/h}$ $L = 39 \text{ m}$	$c = 23 \text{ m/s} = 84 \text{ km/h}$ $L = 350 \text{ m}$	$c = 7 \text{ m/s} = 25 \text{ km/h}$	$c = 14 \text{ m/s} = 50 \text{ km/h}$	$c = 200 \text{ m/s} = 710 \text{ km/h}$ Si $L=200 \text{ km}$ , $h=L/50$ entonces $T=17 \text{ min}$

**Tabla 2.2.** Valores numéricos de propagación del oleaje. Fuente: Meteorología marítima, 2005, INM

La velocidad de fase de las olas en aguas profundas depende de su longitud de onda y, por tanto, de su período. Se trata, de ondas dispersivas, término que se refiere a la separación en la posición a lo largo de la dirección de propagación. Los trenes de olas más largas se propagan con mayor velocidad que los trenes de olas cortas. Por lo que, si un número de olas de diferentes longitudes de onda ha sido generado simultáneamente, las olas más largas irán por delante de las más cortas, de ahí el término precursoras para referirse a las olas de largo período que alcanzan la costa, procedentes de zonas muy alejadas. Además, las olas más cortas tienden a perder energía por efectos de rozamiento más rápidamente que las largas, por lo que se disipan antes y, por ello, no se propagan tan lejos.

### 2.3 ENERGÍA DE LA OLA

En una ola, cada partícula está dotada de energía cinética y energía potencial. La energía cinética corresponde al movimiento de las partículas, resulta de la velocidad de las partículas asociada con el movimiento de la onda. La energía potencial corresponde al desplazamiento de la partícula respecto a su posición de equilibrio, resulta de la masa de fluido de la cresta sobre el valle de la onda.

Por tanto, la energía de una onda regular, aquellas en las que L y T son constantes, es:

$$E = E_p + E_c = (gpb/8) \cdot LH^2 \quad \text{kg/m}$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua en  $\text{kg/m}^3$  y  $b$  es la longitud del frente de ondas.

Puesto que la energía de las olas depende del cuadrado de su altura (H) es evidente que la disminución de esta altura con la profundidad (h) es importante en el estudio de la distribución de la energía de las olas en profundidad. La determinación de la presión ejercida por una ola contra un obstáculo, debida a la transferencia de su energía cinética sobre el mismo, es de gran interés para el aprovechamiento de la energía de las olas.

Se pueden medir presiones del orden de la tonelada por metro cuadrado, e incluso de decenas de toneladas por metro cuadrado durante las tempestades más fuertes, por lo que fácilmente se deduce la importancia que tienen estos valores en la construcción de obras portuarias o en mar abierto o en la misma navegación. La presión de las olas varía, al igual que la energía, con el cuadrado de la amplitud y se atenúa con la profundidad en forma exponencial.

## 2.4 POTENCIA DE LA OLA

La potencia del frente de onda por unidad de longitud ( $b=1$ ) es

$$P = \rho g (H/2)^2 c_g \text{sen}^2(2\pi x/L - 2\pi t/T)$$

siendo  $c_g$  la velocidad del grupo de olas, asociada al avance de la energía, diferente de la velocidad  $c$  de la ola.

En aguas profundas se puede aproximar  $c_g = c / 2$ . La potencia por unidad de longitud de frente de ola, en función del período queda:

$$P = A \cdot H^2 T \quad \text{kW/m}$$

En aguas poco profundas,  $c_g = c$ , y la potencia queda como

$$P = 2A \cdot H^2 T \quad \text{kW/m}$$

### 2.4.1 Oleaje real

Hay que tener en cuenta que la energía contenida en el oleaje, para un determinado estado del mar, se puede describir mediante una función de densidad de probabilidad de la distribución de la energía, dependiente de la velocidad de propagación y de la frecuencia.

La potencia del oleaje se calcula a partir de dichas distribuciones mediante la ecuación

$$P = A \cdot H_s^2 \cdot T_p \quad \text{kW/m}$$

donde A es una constante dependiente del tipo de espectro de energía,  $H_s$  es la altura significativa del oleaje y  $T_p$  es el período de la frecuencia del pico de la distribución de energía.

El oleaje real del mar es una superposición compleja de numerosos trenes de olas no regulares con distintos valores de su período, altura, dirección, etc.

Para diferentes tipos de espectros energéticos (Pierson – Moskowitz, ISSC, Jonswap, etc) los valores de A oscilan entre 0,41 y 0,43.

## 2.5 MODIFICACIÓN DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS

Atendiendo a la morfología de la costa y de los fondos marinos, la energía asociada a la ola puede verse modificada, tanto positiva como negativamente. Los efectos que se producen son los siguientes:

- Refracción. Cambio de dirección que experimenta la ola cuando ésta se acerca a una zona de menor profundidad. El frente de ola se frena y su dirección de propagación se modifica, orientándose paralelo a la costa. Genera concentración o disipación de la energía del oleaje en ciertos tramos de la costa.
- Reflexión. Se produce cuando la ola choca contra un obstáculo vertical, la ola se refleja con muy poca pérdida de energía. Si el tren de ondas es regular, la suma de la ola incidente y reflejada origina una ola estacionaria, cuya energía es dos veces la de la ola incidente.
- Difracción. Es la dispersión de la energía del oleaje a sotavento de una barrera. Provoca una disminución de la altura de la ola detrás de la barrera, sin afectar a la celeridad y la longitud de onda.

A medida que se acerca a la costa la longitud de onda se reduce y la altura se incrementa. El exceso de altura y la disimetría debida al empuje de las olas posteriores provoca un exceso de arqueado, la caída de la cresta y la ruptura de la ola. De esta forma el movimiento de ondulación se transforma en movimiento de translación.

## 2.6 OLAS CATASTRÓFICAS

Las olas catastróficas son el resultado de condiciones no usuales, tales como tormentas intensas sobre o cerca del océano, terremotos submarinos y derrumbes submarinos. Estas olas generalmente causan daños y pérdidas de vidas.

### 2.6.1 *Marejadas*

Los vientos fuertes, normalmente asociados con huracanes, pueden apilar agua sobre una costa provocando un nivel del mar excepcionalmente alto. Estos niveles altos del mar o marejadas pueden ser peligrosos, especialmente si coinciden con los momentos de marea alta en regiones de costas bajas. Las marejadas difieren de otras olas en que presentan más bien un ascenso gradual del nivel del mar que ascensos y descensos rítmicos y rápidos.

### 2.6.2 *Tsunamis*

Su origen está ligado a movimientos submarinos causados por seísmos, derrumbes submarinos o erupciones volcánicas submarinas. En aguas profundas los tsunamis pueden tener longitudes de onda de hasta 180 kilómetros; viajar a velocidades sobre 700 kilómetros por hora; y aun así tener alturas de ola, o amplitudes, de sólo unos pocos centímetros.

Cuando un tsunami llega a aguas someras e irrumpen sobre la costa, pueden ser más altos que cualquier ola generada por el viento. El efecto destructivo de los tsunamis está muy controlado por la topografía submarina y la conformación de la línea de costa.

### 2.6.3 *Ondas estacionarias*

Un tipo de onda común a muchos cuerpos de agua confinados, como bahías y lagos es la onda estacionaria. En una onda estacionaria, la forma de onda no se desplaza hacia delante, sino que la superficie se mueve hacia arriba y abajo. La superficie del agua permanecerá estacionaria en ciertas ubicaciones, llamadas nodos, mientras el resto de la superficie del agua se moverá hacia arriba y abajo.

Las ondas estacionarias pueden ser generadas por tormentas, por cambios rápidos en las condiciones atmosféricas, o por súbitas perturbaciones a la superficie del agua. Una vez generada, el lago o bahía tendrá una oscilación que es controlada por el largo y la profundidad de la cuenca.

### 3 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ

#### 3.1 ENERGÍA UNDIMOTRIZ

A la hora de desarrollar sistemas para el aprovechamiento de la energía de las olas, hay que tener en cuenta una serie de dificultades:

- La amplitud, fase y dirección de las olas es irregular, lo que dificulta la obtención de la máxima eficiencia de los dispositivos que se empleen, debido al amplio rango de frecuencias excitadoras.
- En condiciones climatológicas adversas, como los huracanes, la carga sobre el sistema puede ser 100 veces mayor a la media.
- El acople del irregular y lento movimiento (frecuencias  $\sim 0,1$  Hz) de las olas a los generadores eléctricos requiere de una frecuencia del orden de 500 veces superior.

El diseño del sistema convertidor de la energía ha de ser lo suficientemente sofisticado como para ser eficiente y seguro y, al mismo tiempo, factible económicamente. Como con todas las energías renovables, tanto la disponibilidad como la variabilidad del recurso deben ser determinadas inicialmente. Estas limitaciones implican elevados costes en la construcción de los generadores y una posible reducción de la viabilidad, lo que junto a la falta de información y el desentendimiento, respecto de este tipo de energía, por parte de la industria, los gobiernos y la población ha ralentizado el desarrollo de los sistemas de conversión de este tipo de energía.

Por otro lado, las ventajas de esta fuente de energía son claras, el desarrollo de las mismas está en línea con el desarrollo sostenible, al combinar factores cruciales de la economía, el medioambiente y sociales. Es considerada una fuente limpia de energía renovable, con un impacto ambiental negativo limitado. En particular, esta extensa fuente de energía no precisa de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Con el apropiado diseño de los dispositivos se puede tener una producción de energía económicamente viable, debido a la abundancia de la fuente energética y a los grandes flujos de alta energía de la potencia de las olas. Como ventajas particulares de esta forma de obtención de energía tenemos el reducido impacto ambiental, la variación estacional de la misma, que sigue a la demanda eléctrica en climas templados, y la introducción de generadores síncronos para control de la potencia reactiva. Otro aspecto importante es la escasa demanda en cuanto a uso del suelo, seguido por las tendencias actuales en la explotación de la energía del viento en alta mar.

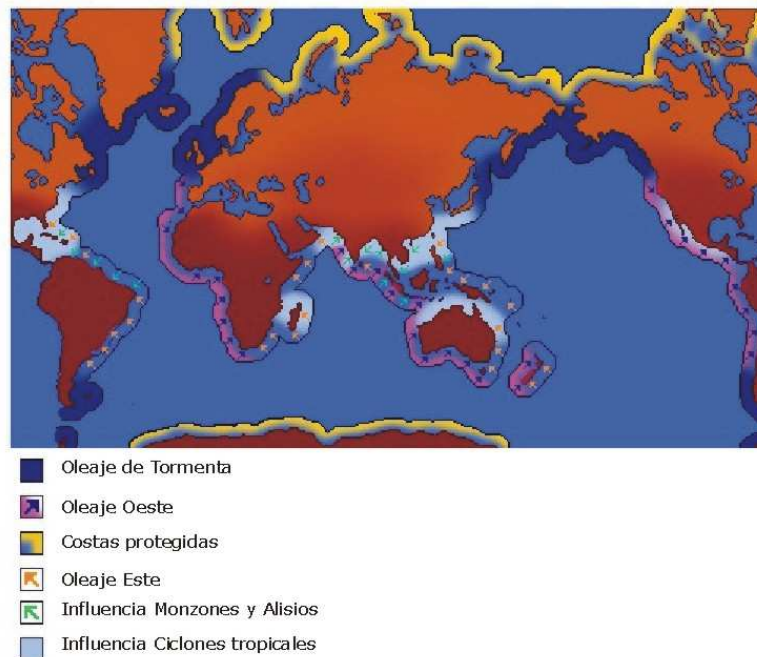
Como para la mayoría de las renovables, la explotación “in situ” implica diversificación del empleo y seguridad en el suministro energético en regiones remotas. La implementación de este tipo de tecnologías a gran escala puede promover la creación de pequeñas y medianas empresas para la explotación de dichas centrales.

### 3.2 RECURSOS ENERGÉTICOS

Las principales áreas de generación del oleaje son aquellas donde soplan los vientos del Oeste en las zonas templadas de los dos hemisferios. Las tormentas dan origen a olas del NO y SO, a partir de los 40° de latitud.

Fuera de estas regiones hay sólo un área importante en la generación de olas: el mar de Arabia, en los meses de junio, julio y agosto, durante el monzón de verano que es muy violento.

Los vientos alisios rara vez generan grandes olas. Los ciclones tropicales generan olas enormes pero en forma muy irregular. Así, la mayor parte de las olas observadas en las regiones intertropicales son originarias de las regiones de latitudes más elevadas y se propagan libremente sobre miles de kilómetros.



**Figura 3.1.** Tipos de oleaje.

Las regiones que tienen alta frecuencia de ocurrencia de vientos fuertes son, en consecuencia, las regiones principales de generación de olas y corresponden a las zonas de actividad frontal en las más altas latitudes de ambos hemisferios.

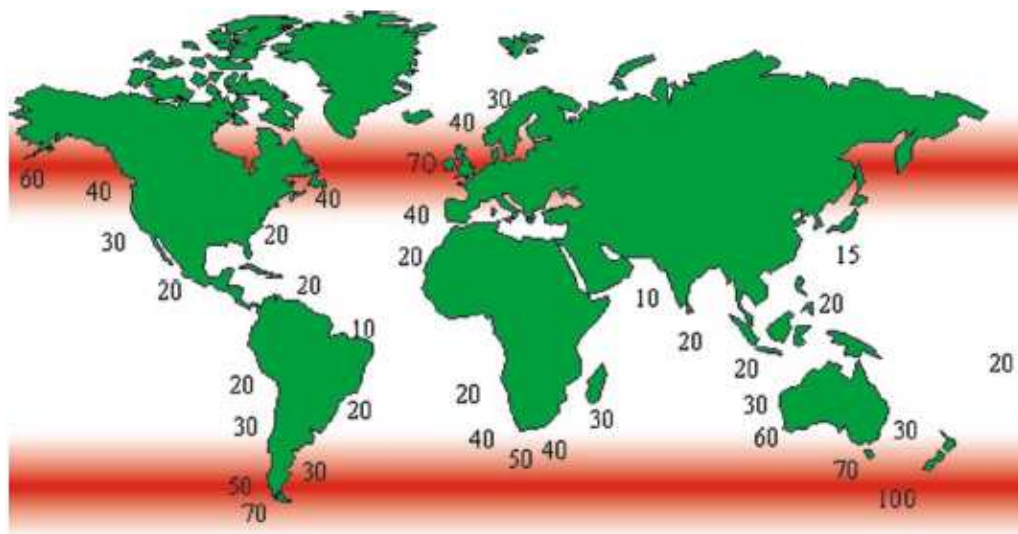
El cinturón de tormentas del sur es el área generadora de olas más clara y definida del mundo porque allí se registran gran cantidad de vientos fuertes (8-9º escala Beaufort), son relativamente persistentes en cuanto a ubicación y soplan sobre largas distancias en el mar.

Las olas de tormenta se generan en las altas latitudes, donde soplan vientos fuertes frecuentes, creando olas altas y de fuerte pendiente. La dirección dominante de los vientos en estos cinturones templados es Oeste.

El oleaje del Oeste se caracteriza por olas largas y bajas que se han generado en los cinturones de tormenta y que posteriormente han disminuido su energía al alejarse de sus áreas de formación. Su nivel energía es mayor en las latitudes más altas y moderado en los trópicos. Son costas relativamente homogéneas, del punto de vista del oleaje, exceptuando parte de las costas de México que pueden estar afectadas por ciclones tropicales; o las costas de la India en que el oleaje puede ser reforzado por olas generadas por el monzón estacional. El oleaje del SO ocurre a lo largo de la costa oeste de América desde California a Chile y en la costa oeste de África.

El oleaje del Este posee niveles de energía bajos a moderados, con la excepción de sectores de costas tropicales afectados por ciclones.

En las costas protegidas el oleaje oceánico no penetra, bien por encontrarse protegidas por cubiertas de hielo, o bien porque se encuentran localizadas fuera de los cinturones de tormenta. Generalmente son ambientes de olas de baja energía las costas polares y los mares cerrados donde hay poco fetch (distancia sobre la que ha soplado el viento) que restringe el desarrollo de la ola.



**Figura 3.2.** Distribución mundial de la potencia de las olas, en kW/m de cresta de ola. Fuente: CRES, año 2002.

La potencia de la ola es proporcional al cuadrado de su amplitud y al período del movimiento, como ya se ha mencionado. Olas con largas longitudes de onda ( $\sim 2$  m) y períodos ( $\sim 7$ -10 s) presentan flujos de energía que pueden superar los 40-50 kW/m de cresta de ola. Como en la mayoría de las energías renovables, la energía de las olas se encuentra irregularmente distribuida a lo largo del planeta. La mayor actividad se encuentra entre las latitudes  $30^\circ$  y  $60^\circ$ , en ambos hemisferios, inducidos por los fuertes vientos dominantes en estas áreas.



**Figura 3.3.** Distribución de la potencia del oleaje en aguas europeas. Fuente: CRES, año 2002.

En lo que respecta al continente europeo, el mayor potencial se concentra en el área del noroeste atlántico, incluyendo el Mar del Norte, y va disminuyendo progresivamente a medida que nos desplazamos hacia el ecuador. El potencial puede variar entre los 75 kW/m de las costas irlandesas y escocesas hasta los 25 kW/m en las costas canarias. En la región atlántica del continente, el potencial total alcanza los 290 kW/m.

La región de menor potencial corresponde a la mediterránea, con valores comprendidos entre 4 - 11 kW/m.



## 4 SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

### 4.1 GEO

Un generador energético del oleaje, GEO, es un dispositivo que transforma la energía del oleaje en energía útil. Tienen que ser capaces de resistir los embates del mar y funcionar eficientemente para las amplias gamas de frecuencia y amplitud de las olas.

Ha habido un gran número de dispositivos concebidos para la conversión o aprovechamiento de la energía de las olas, cerca de 600 patentes desde 1973. A pesar de la diversidad de tecnologías, muy pocos sistemas han pasado la fase de diseño. Sólo unos pocos dispositivos han sido probados a escala real en el mar y sólo uno de los desarrollos puede considerarse cerca de su explotación comercial. Técnicamente, es factible la construcción de dispositivos que funcionen correctamente en el mar. Sin embargo, hay una serie de factores que hacen necesario el uso de prototipos, con el fin de optimizar los sistemas.

A pesar de que se han desarrollado depósitos de pruebas y descripciones matemáticas, se necesita seguir trabajando en estos campos hasta conseguir desarrollar modelos a escala real.

También habrá que determinar, en pruebas a escala real, la fiabilidad de los componentes y la supervivencia de los sistemas durante las tormentas.

Como ya se ha comentado, son muchas las modalidades de GEOs que permiten obtener energía del oleaje, aunque no está todavía claro cuales son las opciones más favorables. Ninguna tecnología se ha impuesto al resto debido, principalmente, a las irregularidades en amplitud, fase y dirección de las olas.

Estos sistemas de aprovechamiento consisten, esencialmente, en dos componentes principales:

- Elemento de interfase. Este elemento es actuado directamente por las olas. Puede estar formado por flotadores que se arrastran o giran por la acción de las olas, o por cámaras de aire en las que la presión cambia por la acción de las olas, bien directa o bien indirectamente a través de una membrana.
- Sistema de extracción de la energía, que amortigua el movimiento de la interfase. Pueden ser sistemas hidráulicos de alta presión, usando generalmente aceite, sistemas hidráulicos de baja presión, generalmente agua de mar, o turbinas de aire.

De lo anterior se desprende que, en todo sistema GEO, la conversión de la energía se lleva a cabo en dos etapas:

- Conversión primaria. Extracción de la energía de las olas mediante sistemas mecánicos o neumáticos, convirtiendo el oleaje en el movimiento de un cuerpo o en un flujo de aire.
- Conversión secundaria. Conversión de movimientos mecánicos o neumáticos en energía utilizable.

La mayoría de estos sistemas están diseñados para obtener electricidad, aunque unos pocos se usan para la desalación de agua de mar, de manera mecánica, es decir, sin convertir previamente esa energía en electricidad.

#### 4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS GEO

Los GEOs pueden ser clasificados atendiendo a:

- Posición relativa a la costa. Pueden estar situados en la costa, cerca del litoral o en alta mar.
- Posición relativa a la dirección del oleaje. Absorbedores puntuales, atenuadores o totalizadores o terminadores.
- Posición relativa al agua. Pudiendo ser fijos o flotantes, semi-sumergidos o sumergidos.

##### 4.2.1 Técnicas de utilización energética del oleaje

Los sistemas, tanto activos como pasivos, se basan en alguna de las siguientes técnicas:

- Empuje de la ola. La energía de las olas puede ser absorbida usando, por ejemplo, un pistón.
- Variación de la altura de la superficie con la ola. Se emplea el efecto de bombeo que proporciona un flotador.
- Variación de la presión bajo la superficie de la ola. Se suele emplear una cámara abierta al mar, que encierra un volumen de aire que se comprime y expande.
- Sistema de rebosamiento. Depósito de agua en altura que se llena a través de una rampa con las olas incidentes.

#### 4.3 TIPOS

A continuación se describen algunos de los sistemas de aprovechamiento energético del oleaje que se encuentran tanto en fase comercial como en investigación y desarrollo. Se han agrupado según su posición relativa a la dirección del oleaje.

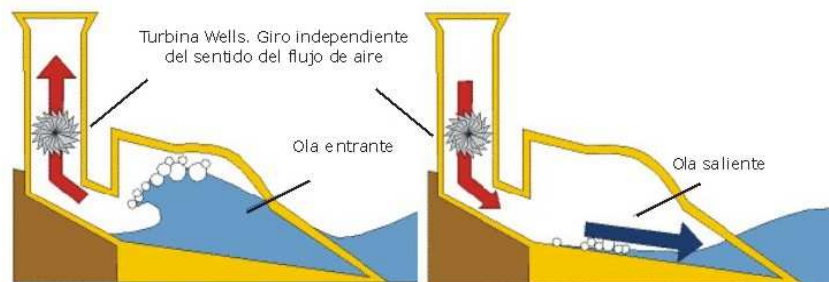
#### 4.3.1 Totalizadores o terminadores

Se encuentran situados perpendicularmente a la dirección del avance de la ola y pretenden captar la energía de una sola vez.

##### 4.3.1.1 Columna oscilante

Los sistemas de columna oscilante (OWC de las singlas en inglés Oscillating Water Column) aprovechan la oscilación del aire dentro de una cámara semi-sumergida y abierta por debajo del nivel del mar (Figura 4.1).

Generan electricidad en un proceso de dos pasos. El agua penetra en una cavidad, forzando al aire que se encuentra en su interior a pasar por una turbina, vaciando dicha cavidad de aire. Al retirarse la ola, la cavidad vuelve a llenarse de aire proveniente del exterior y que pasa, de nuevo, por la turbina.



**Figura 4.1.** Esquema de funcionamiento de un OWC.

Independientemente de la dirección del aire, la turbina gira en el mismo sentido, produciendo corriente eléctrica en el generador. El tipo de turbinas que funcionan bajo estas circunstancias particulares son las conocidas como turbinas Wells.

Este mecanismo puede considerarse el más cercano a un “estado comercial”, ya que el principio de operación es relativamente simple y su construcción emplea tecnología convencional.

En los últimos años, se está tendiendo al diseño de sistemas multiturbinas, MOWC, con lo que se consigue aumentar la potencia de la instalación, aprovechando el hecho de que el flujo de aire es más constante, lo que conlleva a una generación de electricidad más estable.

Dimensiones típicas para un generador OWC de 500 kW: Cavidad de 150 m<sup>2</sup> y una profundidad en la línea de costas de 10 m.

Nombre	Localización	Potencia	Estado	Comentario
Mutriku	España	480 kW	En construcción	Multiturbina
Isla de Pico	Portugal	400 kW	Fase de estudio	
Douro	Portugal	1000 kW	Diseño	Multiturbina
LIMPET	Escocia	75 kW	En funcionamiento	Prototipo
OceanLinx	Australia	500 kW	Prototipo	

**Tabla 4.1.** Dispositivos OWC. Octubre 2007.

A continuación se describen algunas de las instalaciones de este tipo.

### ***OWC Mutriku***

Se ha aprovechado la construcción de un nuevo dique de abrigo para integrar un OWC multiturbina, formado por dieciséis turbinas de 30 kW cada una, que da una potencia instalada de 480 kW.

Los promotores del proyecto son la Dirección de Puertos del Departamento de Transporte y Obras Públicas (Gobierno Vasco), el Ente Vasco de la Energía y la empresa Wavegen Ltd.. Se espera que las obras finalicen en el año 2008. La producción estimada asciende a 960 MWh/año.

### ***Pico OWC***

Instalado en la Isla Pico, la mayor del grupo central de islas que forma las Azores. La costa norte posee un gran potencial energético, favorecido por la forma de la costa, que actúa como un concentrador natural de energía.



**Figura 4.2.** Pico OWC sometido a las condiciones normales de un día de otoño. Fuente: [www.pico-owc.net](http://www.pico-owc.net)

Es un dispositivo OWC de 400 kW, construido entre 1995 y 1998. Ha sido desarrollado por un equipo europeo, coordinados por el Instituto Técnico Superior de la Universidad Técnica de Lisboa, formado por 6 socios portugueses, dos del Reino Unido y uno irlandés. Durante los años 2004 al 2006 se realizaron importantes trabajos de reparación que han permitido mejorar sensiblemente su funcionamiento. Actualmente el sistema se encuentra en fase de estudio.

La planta fue diseñada como una unidad de pruebas a tamaño real, ha sido construida en primera línea de costa y emplea turbinas tipo Wells.

### ***OWC Douro***

Dispositivo diseñado para ser instalado en un dique en construcción en la desembocadura del río Duero, en la ciudad portuguesa de Oporto.

Será un sistema de dos turbinas de 500 kW de potencia nominal cada una, que se estima que producirán 2800 MWh/año.

Los promotores del proyecto son Enernova S. A., Instituto Superior Técnico (Lisboa) y el Instituto Portuario de Transportes Marítimos.

### ***LIMPET***

Es un dispositivo de 500 kW instalado en el año 2000 la isla de Islay, en la costa Este de Escocia. La energía que produce se vierte en la red nacional.

Desarrollado conjuntamente por la Queen's University de Belfast y la empresa Wavegen Ltd.. El diseño final de este dispositivo es el resultado de los estudios realizados con un prototipo inicial de 75 kW. En la actualidad se emplea, a parte de para el suministro eléctrico, como sistema de pruebas de nuevos equipamientos.



**Figura 4.3.** Dispositivo LIMPET en Islay. Fuente: [www.wavegen.co.uk](http://www.wavegen.co.uk)

### ***OWC Oceanlinx***

Desarrollado por la empresa australiana Oceanlinx Ltd.. Presenta un diseño propio de la turbina, con un sistema de control de paso diseñado para optimizar el rendimiento. El

generador ha sido concebido para permitir controlar su velocidad en función de la fuerza del oleaje, lo que permite aumentar su eficiencia.

Los diferentes dispositivos comerciales se han desarrollado a partir del prototipo de 500 kW instalado en Port Kembla, Australia.

Este diseño puede funcionar tanto en alta mar como anexos a muelles y diques.



Figura 4.4. Dispositivo de Oceanlinx. Simulación de fijación a un dique. Fuente: [www.oceanlinx.com](http://www.oceanlinx.com)

#### 4.3.1.2 Dispositivo Tapchan

Consiste en un colector formado por un canal horizontal convergente que concentra el oleaje y eleva el agua del mar a un embalse situado a unos metros por encima del nivel mar convirtiendo la mayor parte de la energía de las olas en energía potencial, para su posterior restitución al mar a través de una turbina convencional tipo Kaplan.



**Figura 4.5.** Dispositivo Tapchan instalado en las costas noruegas en la década de los 80. Fue destruido por una tormenta.

El concepto de TAPCHAN es una adaptación de la producción de energía hidroeléctrica tradicional. Recoge el agua, la almacena y hace funcionar una turbina en su salida.

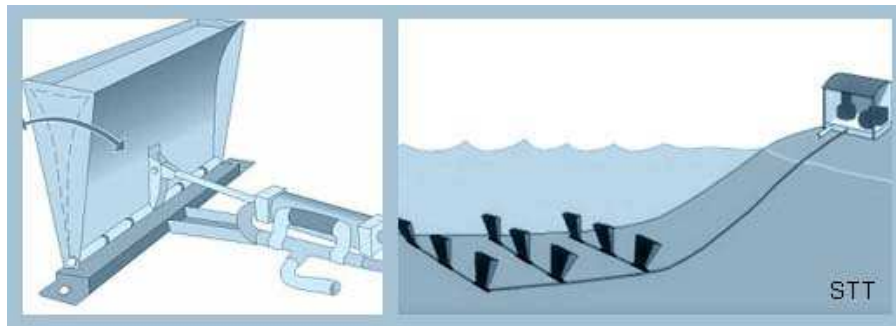
Debido a que cuenta con muy pocas piezas móviles, contenido todo dentro del sistema de generación, los sistemas de TAPCHAN tienen costes de mantenimiento bajos y una mayor confiabilidad.

Las condiciones de funcionamiento limitan los lugares en los que estos dispositivos pueden trabajar. Deben ser costas con olas consistentes, con un buen promedio energético y un rango de mareas inferior a 1 metro. Además, debe contar con espacio suficiente para la construcción de una presa.

#### 4.3.1.3 Otros

##### *WaveRoller*

Este dispositivo consiste en una placa anclada al fondo marino por su parte más baja. El movimiento de vaivén de las partículas de agua bajo la superficie del mar empuja a la placa, que mueve un pistón. La transformación de este movimiento en electricidad se realiza mediante un circuito hidráulico combinado con un sistema motor / generador.



**Figura 4.6.** Esquema de funcionamiento del WaveRoller. Fuente: [www.aw-energy.com](http://www.aw-energy.com)

El sistema es modular, estando cada módulo formado por entre 3 y 5 placas conectadas a un mismo generador. La planta puede entrar en funcionamiento módulo a módulo, no existiendo límite en cuanto al número de elementos a instalar.

El dispositivo ha sido desarrollado por la empresa finlandesa AW-Energy Oy. Durante el año 2005 se realizaron diferentes pruebas con prototipos a escala 1:3 tanto en el Océano Pacífico, en Ecuador, como en el Océano Atlántico, en la costa norte escocesa. Durante el año 2007 se ha realizado el primer desarrollo del sistema a tamaño real, estando en fase de pruebas de funcionamiento.

### 4.3.2 Atenuadores

Se colocan paralelos a la dirección de avance de las olas. Son estructuras largas que van extrayendo energía de forma progresiva. Están menos expuestos a daños y requieren menores esfuerzos de anclaje que los terminadores.

Nombre	Localización	Potencia	Estado
OCEANTEC	España	--	Diseño del prototipo
AWS	Escocia	500 kW	Prototipo a escala
Pelamis	Escocia	375 kW	Prototipo a escala
Wave Dragon	Dinamarca	20 kW	Prototipo a escala
McCabe Wave Pump	Irlanda	450 kW	Prototipo

**Tabla 4.2.** Sistemas atenuadores. Octubre 2007.

A continuación se describen algunas de las instalaciones de este tipo.

#### *OCEANTEC*

Sistema flotante de aprovechamiento de energía de las olas desarrollado por la corporación tecnológica Tecnalia. Aprovecha el movimiento relativo inercial de las olas, mediante un sistema giroscópico.

El sistema captador está totalmente encapsulado y no tiene contacto con el mar.

#### *Archimedes Wave Swing (AWS)*

Desarrollado por la empresa escocesa AWS Ocean Energy. Consiste en una boya de forma cilíndrica anclada al fondo del mar, a una profundidad entre 40 y 100 m. El interior de la estructura es hueco y se encuentra presurizado. El paso de las olas genera un movimiento originado por la variación de la presión hidrostática debajo de la ola. Este aumento de presión origina que la parte superior de la boya comprima el gas que se encuentra en su interior, liberando esa presión cuando pasa la ola.

El movimiento relativo entre la parte flotante y la fija es convertido en electricidad mediante un sistema hidráulico.

El sistema ha sido probado durante el año 2004 en las costas portuguesas. Actualmente se encuentra en estado pre-comercial.





**Figura 4.7.** Izquierda: Representación del sistema. Derecha: Imagen de una boya. Fuente: [www.awsocan.com](http://www.awsocan.com)

### *Pelamis*

Consiste en una estructura articulada, semi sumergida, compuesta por secciones cilíndricas unidas mediante bisagras. Al movimiento inducido por las olas se oponen unos espolones hidráulicos, que bombean aceite a alta presión a un sistema de motores. Estos motores mueven los generadores eléctricos.

La potencia generada en las bisagras es llevada al fondo del mar mediante un cable umbilical. El diseño permite conectar varios dispositivos juntos y unirlos a la costa mediante un solo cable submarino.

La energía producida por este sistema dependerá siempre de las condiciones del lugar de la instalación. Los datos obtenidos de los prototipos en funcionamiento y de las pruebas realizadas indican que es posible aprovechar en torno al 40% del potencial local.

El dispositivo pertenece a la empresa Pelamis Wave Power Ltd.. Cuentan con un prototipo en funcionamiento con una capacidad de generación estimada en 375 kW. El estado actual de la tecnología es previo a la fase comercial.



**Figura 4.8.** Pelamis. Prototipo en condiciones de trabajo. Fuente: [www.pelamiswave.com](http://www.pelamiswave.com)

### *Wave Dragon*

Sistema flotante de conversión de la energía de las olas mediante absorción, desarrollado por un consorcio formado por Danish Energy Authority, Elkraft System's RTD y la Comisión Europea.

Utiliza un reflector de olas diseñado para focalizar las olas hacia una rampa y llenar un tanque de agua. La electricidad es generada por una serie de turbinas de tipo Kaplan.



**Figura 4.9.** Prototipo del Wave Dragon en condiciones de trabajo. Fuente: [www.wavedragon.net](http://www.wavedragon.net)

Se ha desarrollado un prototipo de 20 kW en Nissum Bredning que lleva en funcionamiento desde Marzo de 2003. Los estudios realizados sobre este sistema llevaron al desarrollo de un segundo prototipo en Abril de 2006, con una capacidad de generación comprendida entre 4 – 7 MW.

El estado actual de esta tecnología puede considerarse pre-comercial.

### *McCabe Wave Pump*

Formado por tres pontones rectangulares de acero, los cuales están unidos a lo largo de una viga. Tanto la proa como la popa están amarradas con cierta holgura lo que permite al sistema variar su orientación para enfrentarse a la dirección de las olas.

El movimiento de los brazos articulados genera una presión hidráulica, como resistencia al movimiento de las olas. Dicha presión puede emplearse para generar electricidad.



**Figura 4.10.** McCabe Wave Pump. Prototipo en las aguas del estuario de Shanon. Fuente: Hydram Technologies.

Esta tecnología se encuentra en fase de desarrollo. Durante el año 2004 la empresa irlandesa Hydram Technologies puso en funcionamiento un prototipo de 450 kW en el estuario de Shanon en Irlanda.

#### 4.3.3 Absorbedores puntuales

Son estructuras pequeñas en comparación con la ola incidente. Suelen ser cilíndricas y, por tanto, independientes de la dirección de la ola. Generalmente se colocan agrupados formando una línea.

Su principio de aprovechamiento y transformación de la energía proveniente de las olas se basa o bien en sistemas de bombeo o en sistemas hidráulicos.

##### 4.3.3.1 Sistemas de boyas

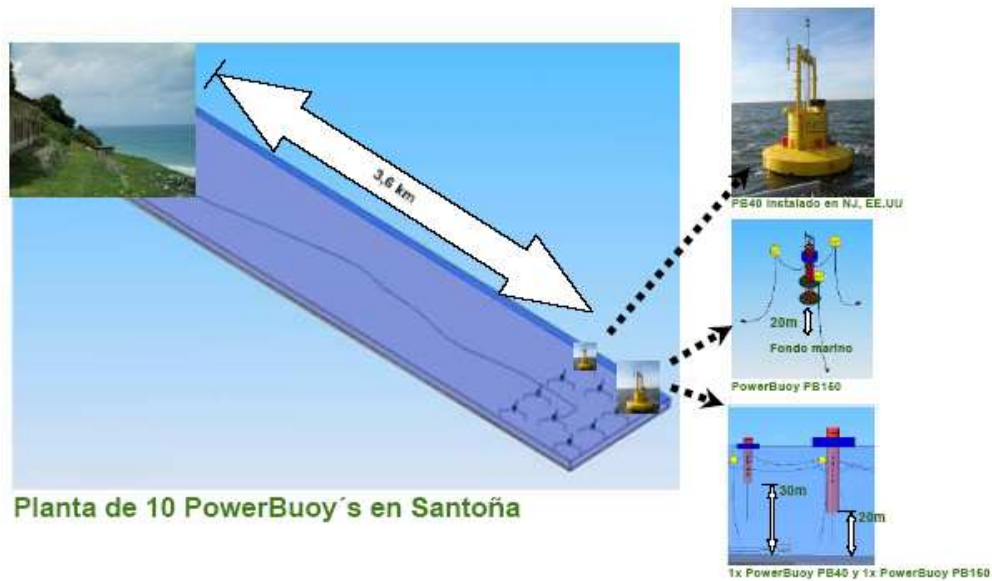
El principio de funcionamiento de estos sistemas es el que se describe a continuación. El flotador de la boya se ve sometido al movimiento de las olas. El movimiento vertical de este flotador mueve una bomba hidráulica, la cual está conectada a un generador trifásico. Estos elementos, flotador, bomba y generador, se encuentran, por lo general en el interior de la boya.

La salida del generador, normalmente corriente eléctrica trifásica en baja tensión, se lleva a una subestación transformadora submarina. Se pasa a alta tensión y se lleva a costa, a través de una línea eléctrica submarina hasta el centro de seccionamiento para su inyección en la red eléctrica.

#### *Santoña*

Sistema de boyas instalado en Santoña, mar cantábrico, formado por una boya de 40 kW. Posteriormente se ampliará a un sistema de nueve boyas de 150 kW cada una. La potencia nominal instalada será de 1,39 MW.

La distancia a la costa será de 3 – 4 km, fuera de pasillos de navegación y próxima a un punto con línea eléctrica.



**Figura 4.11.** Esquema del futuro parque de Santoña. Fuente: Iberdrola.

Es un proyecto en desarrollo, promocionado por Iberdrola en colaboración con la Universidad de Cantabria.

### ***Pisys***

Patente española de un sistema de múltiple captación y transformación complementada de la energía de las olas del mar. El sistema ha sido diseñado para aprovechar los tres principios de captación de la energía undimotriz: diferencias de presión, cuerpos flotantes y rebosamiento.

Está formado por una estructura tubular flotante anclada dinámicamente al fondo marino. El rango de olas productivas se encuentra entre 60 y 550 cm, y necesita de una profundidad de 40 a 100 m. La potencia nominal de cada boya es de 120 kW.

Sistema desarrollado por la empresa PIPO Systems, que cuenta con capital y tecnología española.

Actualmente se encuentra en fase de experimentación en canal hidrodinámico, en la Universidad Politécnica de Cataluña, de un prototipo a escala 1:10. Se espera construir e instalar en el mar un prototipo a escala real durante los años 2007-2008.



**Figura 4.12.** Prototipo a escala 1:10 en el canal hidrodinámico. Fuente: PIPO Sistem, SL.

### ***Hidroflot***

Sistema de flotadores aunados en una misma estructura desarrollados por la empresa española Hidroflot, SL.



**Figura 4.13.** Esquema representativo de una plataforma. Fuente: Hidroflot, SL.

Un grupo productor compuesto por diez unidades de 48 flotadores ensamblados con una salida común de cable, podría generar hasta 192 MW de potencia eléctrica de salida, con una ocupación de aguas de 2 millas cuadradas.

Esta tecnología permite recoger todo el empuje de diversas unidades de flotadores, para concentrar a una salida común todo el empuje mecánico y permitir a los generadores alcanzar la máxima potencia eléctrica de salida de forma estable en cualquier desplazamiento de la ola.

### ***AquaBuOY***

Desarrollado por la empresa canadiense Finavera Renewables ([www.finavera.com](http://www.finavera.com), anteriormente Aqua Energy Group). Consiste en una estructura flotante que convierte la energía cinética asociada al movimiento vertical de la ola incidente en electricidad.

Una boya cilíndrica absorbe el movimiento de las partículas del agua que se transfiere a través de una columna de agua encerrada en un tubo situado bajo dicha boya.



**Figura 4.14.** Prototipo del AquaBuOY. Fuente: [www.finavera.com](http://www.finavera.com)

El sistema de captación y transformación de la energía está formado por cuatro elementos:

- **Boya.** Es el elemento encargado de captar la energía.
- **Tubo de aceleración.** Situado bajo la boya y unido rígidamente a ésta. Se encuentra abierto tanto en la parte superior como en la inferior, de forma que el agua puede circular libremente por su interior.
- **Pistón.** En situación de reposo se encuentra situado en medio del tubo de aceleración, debido al equilibrio en la tensión de los elastómeros que lo unen al fondo y a la parte inferior de la boya, respectivamente.
- **Bomba de manguera.** Es una manguera de elastómeros reforzada con metal, cuyo volumen interior se reduce cuando se estira, actuando, por tanto, como una bomba. De esta forma se hace pasar el agua a un tanque de alta presión que mueve un generador eléctrico.

La electricidad generada se lleva a tierra a través de un cable submarino.

#### 4.3.3.2 Sistemas de cabeceo

Aprovecha el movimiento de subida y bajada alternativas de la proa y popa de un cuerpo que flota en la superficie del océano. Este movimiento es transformado en electricidad mediante un sistema hidráulico.



El dispositivo más característico es el conocido como “Salter Duck”, desarrollado en la década de 1970 por el profesor de la Universidad de Edimburgo, Stephen Salter. Los estudios teóricos del sistema arrojaban un aprovechamiento del 90% de la energía de la ola y una eficiencia del 90% en la transformación de dicha energía.

La línea de financiación del proyecto se cerró a finales de la década de 1980, sin que se hubiera conseguido pasar de la fase de prototipo. Sin embargo, los estudios realizados permitieron el desarrollo de los actuales canales hidrodinámicos usados en la actualidad.

## 5 IMPACTO AMBIENTAL

### 5.1 MORFOLOGÍA OCEÁNICA

#### 5.1.1 *El margen continental*

El margen continental es la zona comprendida entre el continente y la llanura abisal o de los grandes fondos oceánicos y es una zona de transición tanto geográfica como geofísica. En el margen continental se pueden diferenciar cuatro grandes divisiones fisiográficas: la zona costera o litoral, la plataforma continental, el talud continental y el glacis continental.

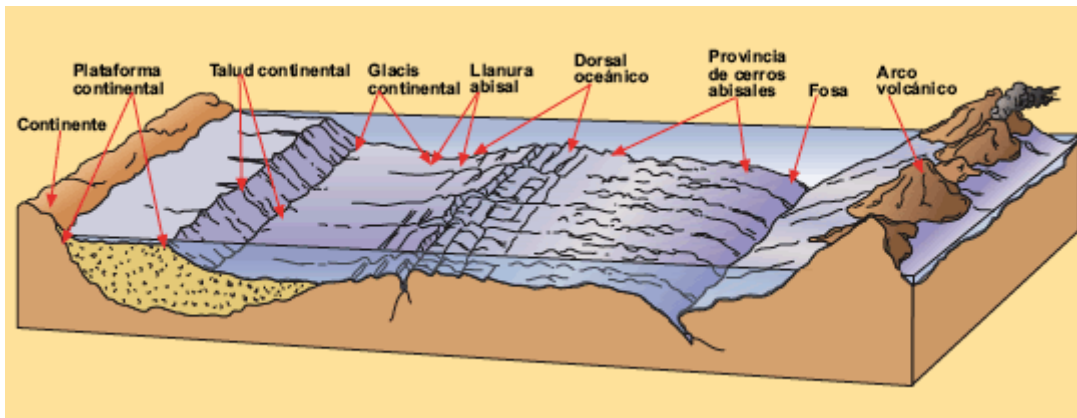


Figura 5.1. Divisiones fisiográficas en el margen continental.

#### 5.1.2 *Morfología del litoral*

La transición entre el mar y la tierra se produce en las aguas poco profundas de la orilla que cubren las plataformas sumergidas y los estuarios de todo el mundo. Los fenómenos costeros se inician allí con la mezcla, la separación y el transporte de los sedimentos y de las aguas que escurren desde la tierra. Las olas, los vientos y las corrientes dan forma a las costas en todo el mundo, y su interacción con la tierra determina la configuración de la costa y la batimetría adyacente. El movimiento de los sedimentos a lo largo de las orillas es sorprendentemente importante. El transporte de arena de las playas a lo largo de varias costas oceánicas puede alcanzar un volumen superior al millón de metros cúbicos por año.

Las aguas de las orillas y de los estuarios son la porción del mar que predomina, más que cualquier otra cosa, sobre el que hacer cotidiano de la humanidad. Alrededor de dos tercios de la población mundial vive cerca de la costa. Allí es donde las olas, el oleaje provocado por los cambios meteorológicos bruscos, las mareas y los cambios seculares del nivel del mar alcanzan su mayor altura. Las aguas de la orilla dan contra las playas, los puertos y los estuarios, tan importantes para la industria, la recreación y la habitación humana.



Existen varios sistemas de clasificación de litorales, siendo uno de los más habitualmente empleados aquél que se basa en la naturaleza de los agentes geomorfológicos más notables en la modelación de su topografía.

De acuerdo con esta clasificación, las costas son primarias si han sido formadas predominantemente por agentes terrestres o sísmicos (ríos, volcanes, etc.); y secundarias si los agentes responsables de su formación han sido de origen marino (olas, corrientes, etc.). Debido a su situación, el litoral está sujeto a grandes modificaciones y cambios en su aspecto, influyendo fundamentalmente los fenómenos de erosión y sedimentación.

La zona litoral está comprendida por la parte supralitoral, la intermareal y la sublitoral. La parte supralitoral está constituida por la zona azotada por el rocío de las olas y el aerosol del agua salada que la baña. Constituye un hábitat para cierto número de especies marinas.

La parte intermareal o mesolitoral propiamente dicho, está enmarcada por las líneas de pleamar y bajamar, es decir, constituye la franja costera que cubre y descubre periódicamente la marea.

Finalmente, la parte sublitoral se extiende desde la línea de la bajamar hasta el borde de la plataforma continental.

## 5.2 LOS SEDIMENTOS OCEÁNICOS

Los sedimentos marinos están constituidos por material de diversa textura y procedencia, que bajo diversos factores físicos, químicos y biológicos se acumulan en el fondo marino en capas, donde suavizan la topografía submarina, consolidándose con el transcurso de los siglos y formando rocas sedimentarias. La procedencia de este material es variada, pudiendo obtenerse una clasificación general de los sedimentos de acuerdo con su origen

Una vez el material en el océano, antes de su incorporación al mismo como parte permanente en forma de sedimentos, tiene que sufrir una serie de influencias de tipo físico, químico y biológico que van a incidir directamente en su carácter.

Los factores físicos más importantes son los derivados de la topografía submarina, de las propiedades físicas del agua, de la dinámica del océano y de factores climáticos. Todos interaccionan en el transporte de sedimentos, que es un factor primordial en la determinación del lugar donde se depositan los mismos.

El factor químico que afecta en mayor medida a los sedimentos es la composición relativa del agua de mar, ya que en mayor o menor medida incidirá en la solubilidad de determinados compuestos, y también el pH, que es un índice de su alcalinidad.

Los factores biológicos por otra parte, guardan relación con el número y la clase de organismos presentes, ya que algunos incorporan sílice o calcio para la formación de esqueletos o estructuras rígidas, y otros absorben cierto tipo de sustancias para su conversión en materia orgánica, como es el caso de las plantas marinas.

El clima actúa de manera notable como factor regulador de los sedimentos ya que controla tres factores importantes como son: la temperatura, la salinidad y la distribución de los organismos en el agua.

El material descrito, una vez transportado e interactuado con los diferentes agentes oceánicos, se deposita en el fondo constituyendo los sedimentos.

### 5.2.1 *Dinámica sedimentaria*

Las fuentes de donde proceden los sedimentos marinos son los continentes, el propio océano y la atmósfera. La mayor parte de ellos se deriva de la erosión de la tierra continental; es decir, del desgaste de las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, que finalmente son transportadas hasta el mar por los ríos. Los de origen oceánico están constituidos por los restos de los organismos que viven en él, así como por las partes que se desprenden de los volcanes submarinos a causa de las corrientes y de la desintegración por acción química. De la atmósfera proceden gases como el bióxido de carbono, que contribuyen a estructurar las calizas marinas, las cuales forman a su vez fangos calcáreos en los fondos marinos.

A la hora de estudiar la circulación de sedimentos vamos diferenciar entre las siguientes zonas:

- Zona de batida. Parte inclinada de la playa comprendida entre los límites de las mareas alta y baja.
- Zona sublitoral. Es la parte más profunda de la playa y da paso gradualmente a la plataforma interna. El límite entre ambas es fluctuante, pues se establece a partir del nivel medio de base del oleaje de buen tiempo, y se extiende una cierta distancia que se llama zona de transición.
- Plataforma continental. A continuación del litoral, no es más que el borde continental sumergido

En la zona de batida el proceso dominante es la batida del oleaje, que selecciona muy bien el sedimento y produce laminación paralela de régimen de flujo alto inclinada hacia el mar. Los grupos de láminas correspondientes a sucesivos episodios de depósito son discordantes entre sí, puesto que la pendiente de la playa varía continuamente y están separados por superficies erosivas que reflejan los arrasamientos periódicos que sufre.

Al pie de la zona de batida se encuentra una acumulación de las fracciones más gruesas de sedimento disponible y de fósiles que forman el escalón. Su estructura interna consiste en estratificación cruzada apuntando hacia el mar si el tamaño de grano permite su desarrollo; en otros casos, cuando el tamaño es muy grueso, sólo se encuentra la acumulación.

En la parte inferior de la zona sublitoral el sedimento más característico es la de arena fina a limo, con laminación paralela. En períodos de tempestad o mar de fondo (oleaje de gran período que ha viajado a gran distancia desde el punto en que fue generado), cuando llegan a la costa olas de grandes longitudes de onda, el fondo puede ser removido y, al decrecer la energía ambiental, se asienta el sedimento nuevamente, generando capas arenosas de espesor variable, con granoselección positiva y estructura interna que registra la disminución energética, de modo semejante a los depósitos de mar somero. En buen tiempo se produce rápidamente la decantación de las fracciones finas que cubren las capas arenosas de tormenta y el fondo suele quedar sometido a bioturbación.

Hacia las zonas más someras, la acción del oleaje sobre el fondo es más intensa y continuada, produciendo estratificación y laminación paralela. Las olas que llegan producen formas de fondo que migran hacia tierra, mientras que la resaca y los vientos de tierra las hacen migrar hacia el mar. Por su parte las corrientes paralelas a la costa generan formas de fondo, también paralelas a aquella. Las mareas pueden dar lugar a un amplio abanico de corrientes perpendiculares, oblicuas o incluso paralelas a la línea de la costa, cuya distinción de los anteriores es más difícil, pues se basaría en la mayor constancia, y en la posible variación regular de la energía reflejada en las estructuras individuales y en las superficies de pausa y reactivación.

En la plataforma continental, el principal agente de transporte sedimentario son las corrientes, ya que la acción de las olas y las mareas es muy escasa:

- Corrientes de deriva. Corrientes superficiales producidas por la acción del viento; se mueven a una velocidad de 100 a 200 m/seg. Distribuyen las partículas procedentes de la costa y la propia plataforma (y no depositadas en ella) por todos los mares y océanos.
- Corrientes de densidad. Movimientos en general lentos de grandes masas de agua que tienden a disponerse estructuradas en capas según su densidad. Las corrientes de densidad más características son las que, procedentes de los polos, van ocupando lentamente el fondo de todos los océanos; estas corrientes a una profundidad entre 1.000 y 2.000 metros tienen una velocidad media comprendida entre 2 y 8 cm/seg., a mayor profundidad la velocidad disminuye. En elevaciones del fondo marino las corrientes aumentan hasta 10 veces su valor, lo que produce una reducción notable de la velocidad de sedimentación con frecuentes interrupciones sedimentarias.

- Una variante de las corrientes de densidad son las de paso de un mar a otro (por ejemplo de un mar cerrado a un mar abierto). Se trata de cambios de masas de agua que intentan amortiguar diferencias de densidad, temperatura o salinidad entre las dos masas acuosas. Se pueden diferenciar dos tipos de circulación desde un mar abierto a un mar cerrado; la primera, de tipo estuario es aquella en la que las aguas superficiales salen y las profundas entran. La segunda (de tipo lagoon o mediterráneo) tiene una circulación en sentido contrario, o sea, superficial desde el mar abierto al cerrado (entran) y las aguas profundas salen. Estos tipos de circulación entre cuencas y los cambios en los mismos regulan la existencia de fases con mayor o menor contenido en nutrientes.

Otros factores influyen en la sedimentación, con carácter más local. Uno de ellos es la naturaleza y morfología del fondo. Cuando éste es de corteza oceánica recientemente formada se está en condiciones óptimas para la formación de sedimentos anómalamente ricos en óxidos de manganeso y de hierro. Otro efecto, de gran interés, es el reflejado en las elevaciones submarinas (seamounts), donde la acción de las corrientes evitan parcial o totalmente el depósito y dan lugar a series condensadas o reducidas.

La actividad volcánica localmente puede dar lugar a acumulaciones de rocas piroclásticas y en regiones más amplias pueden dar contenidos anómalos de vidrio o cenizas volcánicas.

El viento igualmente puede influir de manera local más concretamente en las áreas próximas a desiertos, donde el viento puede llevar hasta regiones marinas lejanas al continente gran cantidad de partículas de tamaño limo en suspensión con lo que se tiene un incremento anómalo de material terrígeno. Se ha considerado que el viento puede ser el agente de transporte principal del material terrígeno en el centro de los océanos y que en la fracción fina no biogénica de los sedimentos oceánicos profundos del 10 al 75 por ciento es de origen eólico.

Otro factor que influye de manera notable es la subdivisión de cuencas que pueda condicionar la circulación de las aguas, de unas a otras. Se pueden dar condiciones especiales en el circulación y cambios alternativos en la misma (de tipo estuario a tipo lagoon, o viceversa), que ocasionan cambios bruscos en la sedimentación pelágica de los mares cerrados.

### 5.3 IMPACTOS AMBIENTALES SOBRE EL MEDIO MARINO

Los efectos sobre el medioambiente dependerán estrechamente del tipo de dispositivo utilizado.

### 5.3.1 *Impacto sobre la vida del litoral*

Algunos de los sistemas de aprovechamiento descritos implican la construcción de sistemas que o bien modifican directamente el entorno al ser construidos sobre ellos, o indirectamente, debido a que se crean, a su alrededor, vías de servicio, transformándose en zonas de paso habitual.

Se genera, por tanto, una destrucción o modificación del hábitat de especies vegetales y animales.

### 5.3.2 *Impacto sobre la vida en el mar*

Dependiendo del sistema empleado, se puede llegar a destruir, a nivel local, el hábitat de especies tanto vegetales como animales.

El área de influencia abarca todas las zonas del litoral, la supralitoral, mesolitoral y sublitoral.

### 5.3.3 *Impacto sobre la morfología del litoral*

Se producen modificaciones en los mecanismos de sedimentación, debido a las variaciones en la morfología del litoral.

Al mismo tiempo, se generará un impacto visual debido a esas mismas modificaciones.

### 5.3.4 *Otros impactos*

A parte de los ya mencionados, se pueden destacar:

- Impacto visual provocado por los propios sistemas de aprovechamiento energético.
- Impacto sonoro debido al ruido que estos elementos puede llegar a generar
- Impacto sobre las actividades humanas. Como pueden ser modificaciones en zonas de ocio y deportivas, modificaciones que afecten a la navegación y a actividades de pesca, entre otros.

5.4 CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO

	VIDA LITORAL	VIDA MAR	MORF. LITORAL	VISUAL	SONORO
<b>Terminadores</b>					
Costa	ALTO	MEDIO	ALTO	ALTO	MEDIO
Próximos a costa	BAJO	MEDIO	BAJO	MEDIO	BAJO
<b>Atenuadores</b>					
Flotantes	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	BAJO
Semi sumergidos	BAJO	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO
Absorbedores puntuales	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO

**Tabla 5.1.** Caracterización del impacto ambiental de las diferentes tecnologías de aprovechamiento de la energía undimotriz. Fuente ITER, SA.

## 6 ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

Aunque son varios los dispositivos en desarrollo, aún quedan importantes retos tecnológicos que solucionar, los cuales podemos agrupar atendiendo a:

- Tecnología de conversión energética: Hay que superar los problemas originados por la discontinuidad de la energía y las irregularidades en amplitud, fase y dirección de las olas. Además, estos sistemas necesitan de cargas estructurales muy altas para supervivencia en condiciones extremas.
- Conexión a la red eléctrica: Debido a que el periodo del oleaje es lento (0,1 Hz) frente a la red eléctrica a conectar (50 Hz). También existen problemas de estabilidad de conexión a la red, así como la falta de infraestructuras eléctricas próximas a la costa.

El gran reto al que nos enfrentamos es el de ser capaces de desarrollar un sistemas robustos y fiables para poder soportar las adversas condiciones climatológicas a las que estos sistemas pueden llegar a verse sometidos.



**Figura 6.1.** Condiciones de mar adversas. Se pueden dar tanto en la costa como en alta mar. Los sistemas de aprovechamiento energético deben estar preparados para resistir estas condiciones.

La superación de estos retos pasa por la formación de grupos de desarrollo multidisciplinarios y multisectoriales, debido a la diversidad de tecnologías involucradas:

- Conocimiento y comportamiento del medio marino: Oceanografía, Dinámica de fluidos, Impacto ambiental.
- Construcción de dispositivos: Modelización y diseño, Desarrollo de modelos matemáticos, Construcción naval, Tecnología hidráulica o neumática, Tecnología eléctrica y electrónica.
- Instalación y explotación: Técnicas de predicción de oleaje, Análisis de ubicaciones, Técnicas de instalación y fijación de objetos en el mar, Cableado submarino.

Con respecto a la viabilidad económica, ésta depende fuertemente de la tarifa eléctrica, por lo que es necesario el apoyo del Ministerio en las etapas actuales de desarrollo de esta tecnología. Este apoyo puede encauzarse bien a través de una tarifa especial, o bien a través de subvenciones.

Como puntos fuertes de esta tecnología podemos destacar:

- El alto potencial de las costas europeas atlánticas, no sólo continentales, sino también archipelágicas.
- La escalabilidad de los sistemas, que permite construir dispositivos de mayor potencia mediante la combinación de elementos iguales de menor potencia.
- El bajo impacto ambiental de una energía limpia y totalmente renovable. Y, según qué dispositivos, silenciosa y poco visible.

En el estado actual de desarrollo de estas tecnologías las perspectivas de futuro son muy alentadoras. El principal aliciente lo pone el Plan Singular y Estratégico en Energías Marinas (PSE-MAR), financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Este plan pretende situar a España como referente internacional de la industria de la energía de las olas.

Los pilares sobre los que se asienta este plan son:

- El desarrollo tecnológico de sistemas y equipos de captación y transformación de energía de las olas a partir de patentes y tecnología española.
- El desarrollo de una infraestructura de experimentación de esta energía que permita probar los desarrollos que se generen, tanto nacionales como internacionales.

A nivel mundial, la energía undimotriz se encuentra en fase de desarrollo, por lo que aún no se ha perdido el tren de la tecnología.