

1. INTRODUCCIÓN

Se entiende el término fuentes de energías renovables aquellas que virtualmente son inagotables dado que son capaces de regenerarse naturalmente. Los sistemas de generación de energía renovable más conocidos son los sistemas de generación eólicos, los sistemas de generación solar y los sistemas de generación hídricos. Pero existen otras alternativas de generación que han captado la atención de los investigadores en los últimos años como la biomasa, la geotérmica, la mareomotriz y la undimotriz. En esta última la energía se produce por el movimiento de las olas.

1.1 Energía Undimotriz o de las Olas

La energía de las olas es una forma de almacenamiento de la energía solar. El sol produce diferentes temperaturas a través del planeta generando vientos que soplan sobre la superficie del océano que a su vez causan el oleaje (Figura 1.1). Las olas pueden viajar cientos de kilómetros con mínima pérdida de energía y con una densidad de potencia mayor que la potencia del viento o la potencia del sol. Estas olas de aguas profundas no deben ser confundidas con las olas que vemos rompiendo contra las costas o las playas.

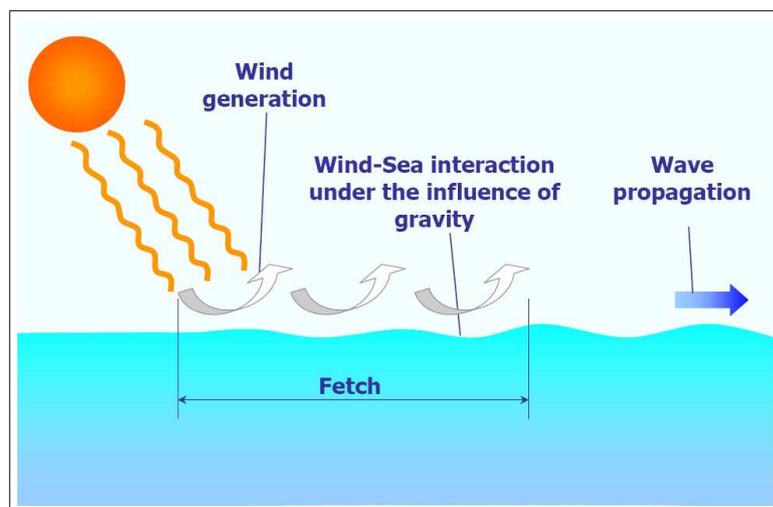


Fig. 1.1: Proceso de creación de la ola
(CRES 2006)

Cuando una ola se acerca a la costa se hace lenta, decrece en longitud de onda y crece en altura. La mayor parte de la energía se pierde en la fricción con el suelo marino y solo una fracción de la misma alcanza la orilla.

Una ola contiene tanto energía cinética como energía potencial gravitacional (Figura 1.2). La potencia transportada por la ola depende de la altura y del período, y es usualmente dada en unidades de potencia entre unidades de longitud (W/m).

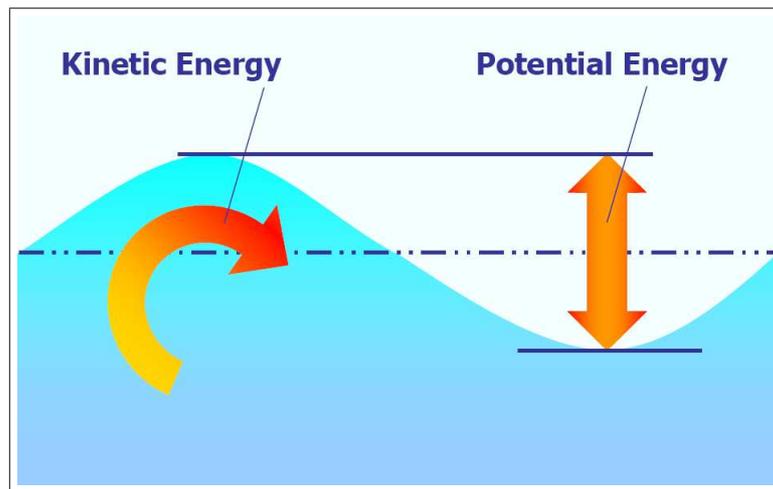


Fig. 1.2: Energía de la ola
(CRES 2006)

Como ocurre con las otras formas de energía renovable, la energía de las olas no está distribuida uniformemente alrededor del planeta. La distribución global de los niveles de potencia de las olas se muestran en la figura 1.3 en donde las unidades están dadas en kW/m de frente de onda. (CRES 2006). Como se observa en la figura 1.3 las mayores fuentes de energía de las olas se encuentran entre los 30 grados y los 60 grados de latitud en ambos hemisferios. Particularmente los grandes recursos se encuentran a lo largo de la costa occidental de Europa, fuera de las costas de Canadá y Estados Unidos y en la costa sur de Australia y América del Sur.

En la figura 1.4 se muestra la distribución de los niveles de potencia de las olas en Europa. En la misma se puede apreciar que la costa oeste está favorecida con un promedio de 50 kW por cada metro de frente de onda incidente. Los recursos totales, alrededor de 2 TW, son del mismo orden de magnitud del consumo mundial de electricidad. Una estimación conservadora es que se puede extraer del 10 % al 25 % de ésta (Cruz 2008).

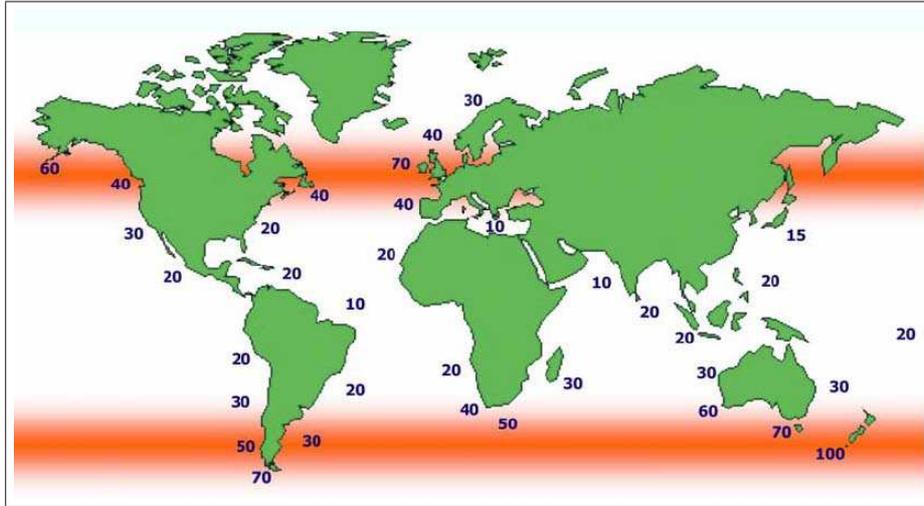


Fig. 1.3: Distribución global de los niveles de potencia de las olas (CRES 2006)

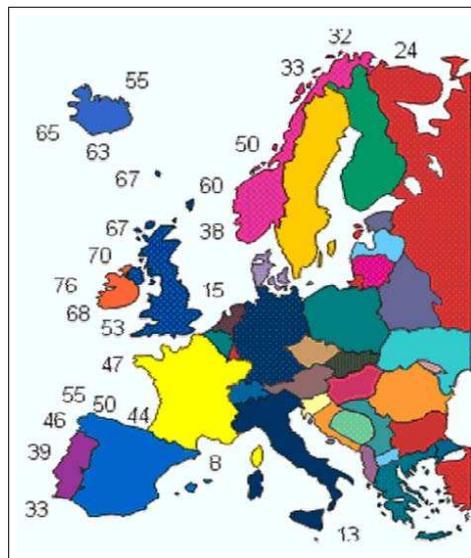


Fig. 1.4: Distribución de los niveles de potencia de las olas en Europa (CRES 2006)

1.2 Terminología y Conceptos Básicos

Para la estimación de la energía y la potencia de las olas es necesario describir los parámetros que la definen. Una ola puede representarse como una onda plana, es decir, para un instante de tiempo específico la fase de la ola es constante en todos los planos perpendiculares a la dirección de propagación.

El modelo matemático de una onda plana, progresiva, armónica, sobre aguas profundas se presenta analíticamente en la ecuación 1.1 y gráficamente en la figura 1.5.

$$\eta(x, t) = A \cos(\omega t - kx) \quad (1.1)$$

El modelo de la figura 1.5 $\eta(x, t)$ representa la elevación de la ola en función del tiempo y la distancia. En este modelo el parámetro A representa la elevación máxima, ω la velocidad angular temporal, k la velocidad angular espacial, t el tiempo, x la distancia, L la longitud, H la altura, h la profundidad, C la velocidad del frente de ola o velocidad de fase y SWL el nivel de la superficie marina.

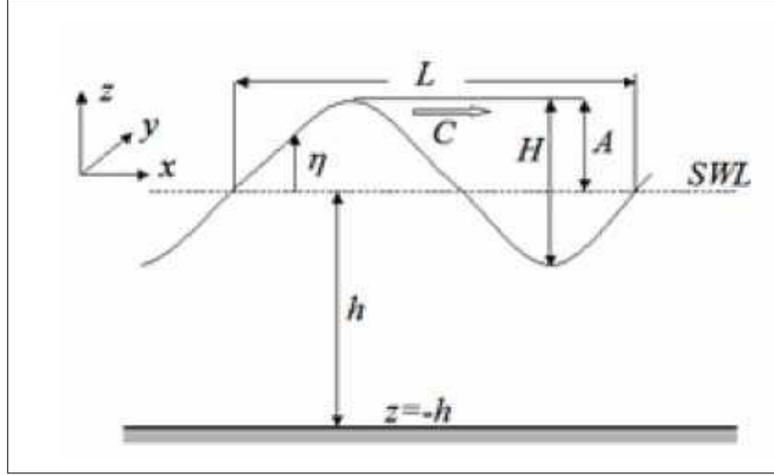


Fig. 1.5: Parámetros que definen la ola
(Falnes 2004)

Se puede demostrar que tanto la energía potencial como la cinética asociada a la ola por unidad de area horizontal se puede calcular mediante la ecuación 1.2 (Falnes 2004).

$$E = \frac{\rho g}{4} A^2 \quad (1.2)$$

Donde ρ es la densidad del océano y g la aceleración de la gravedad. La energía total almacenada en la ola por unidad de area será entonces:

$$E = \frac{\rho g}{2} A^2 \quad (1.3)$$

La potencia promedio de la ola por unidad de longitud de frente de ola o transporte de energía de la ola J se puede calcular mediante el producto de la velocidad del frente C por la energía por area horizontal E . Tomando en cuenta que la velocidad de propagación del frente de una onda plana, progresiva, armónica sobre aguas profundas es (Falnes 2004):

$$C = V_f = \frac{\omega}{k} = \frac{g}{\omega} \quad (1.4)$$

Tendremos que el transporte de energía de la ola vendrá dado por la expresión:

$$J = \frac{\rho g^2}{2\omega} A^2 \quad (1.5)$$

Recordando que la altura H de la ola es dos veces la elevación máxima A y que la frecuencia angular temporal ω es 2π entre el período de la ola, la ecuación 1.5 se puede escribir:

$$J = \frac{\rho g^2}{32\pi} T H^2 \text{ W/m.} \quad (1.6)$$

Para ilustrar la aplicación de la ecuación anterior, tómesese un valor de altura $H=2$ m, un período $T=2$ s y como la densidad del agua de mar $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$. Para estos valores se tendría un transporte de energía de ola de 40 kW/m aproximadamente.

Para un cuerpo flotante aislado expuesto al oleaje, se emplea el ancho de captura para evaluar el desempeño del dispositivo para capturar la potencia del oleaje. A una frecuencia dada el ancho de captura $\mathcal{L}(\omega)$ se define como la potencia media absorbida por el cuerpo P entre la potencia promedio por unidad de ancho de cresta de la ola incidente J (Cruz 2008).

$$\mathcal{L}(\omega) = \frac{P}{J} \text{ m.} \quad (1.7)$$

Se debe comentar que algunos autores emplean el término longitud de absorción o ancho de absorción en lugar de ancho de captura. El ancho de captura tiene dimensiones de longitud aunque algunas veces la medición suele expresarse adimensionalmente calculándose como la tasa entre el ancho de captura y el ancho del dispositivo.

El máximo ancho de captura de un dispositivo con una geometría específica a una frecuencia dada se obtiene optimizando respecto a los parámetros del mecanismo de extracción de potencia. Si un dispositivo es ajustado para operar óptimamente a una frecuencia específica, entonces, ésta determinará los parámetros de extracción de potencia y la curva de ancho de banda. La curva de ancho de banda se determina graficando el ancho de captura contra la frecuencia para los parámetros de extracción de potencia encontrados (Cruz 2008).

1.3 Breve Reseña de las Investigaciones sobre Convertidores de Energía de las Olas

Aunque la primera patente para un equipo de conversión de energía de las olas es del año 1799 fue en la década de los setenta que se intensificaron las investigaciones particularmente en el Reino Unido. Se debe comentar que uno de los trabajos pioneros en el área lo realizaron los japoneses hacia 1960 cuando construyeron boyas marcadoras que usaban energía de las olas en sus lámparas. El punto de quiebre que impulso la investigación en varios países fue la publicación de un artículo por parte del Profesor Stephen Salter de la Universidad de Edimburgo en la revista científica Nature. En plena crisis petrolera de la década sus conclusiones llamaron

la atención de los investigadores de los países industrializados. La idea, una estructura flotante en forma de cámara conocida como el pato de Salter, todavía se reconoce como uno de los sistemas más eficientes en absorber energía de las olas.

En los años ochenta el gobierno del Reino Unido tomó la decisión de enfocar todos los fondos de investigación sobre la energía de las olas en un gran sistema de generación con capacidad para 2 GW de potencia. A pesar de la sugerencia de muchos científicos de dispersar la generación en pequeñas centrales del orden de los MW, el sistema de generación fue un fracaso e implicó un estancamiento en los avances que habían tenido lugar (Cruz 2008).

Ya a mitad de los años noventa se habían dado significativos avances en el desarrollo de sistemas de generación mar adentro con prototipos conectados a los sistemas nacionales de energía. Como ocurrió con los sistemas de generación eólicos la generación undimotriz se encamina hacia un dispositivo definitivo de uso comercial. En este orden de ideas, gobiernos como los de Portugal y el Reino Unido han invertido en prototipos precomerciales, construyendo centros de investigación y desarrollo que aseguran, a mediano plazo, el desarrollo de la industria de energía de las olas.

1.4 Convertidores de Energía de las Olas

El movimiento de las olas puede convertirse en energía mecánica y luego en energía eléctrica usando sistemas apropiados. Los convertidores de energía de las olas generalmente se refieren en la literatura como dispositivos WEC que es el acrónimo en inglés de *Wave Energy Converter*. Existen alrededor de cuarenta mecanismos para explotar la energía de las olas. Con la finalidad de obtener un panorama del abanico de dispositivos que se han desarrollado, se describirán los convertidores de energía de las olas a partir de su clasificación.

Existen diferentes taxonomías que clasifican los dispositivos que extraen energía de las olas. Algunas están basadas en la posición del dispositivo respecto a la costa, en la generación a la cual pertenece el dispositivo en la historia de los desarrollos, en el modo de movimiento, en el flujo de potencia, en el principio de funcionamiento, etc.

Según el sitio de la instalación los convertidores de energía de las olas se clasifican en dispositivos sobre la costa, cerca de la costa y lejos de la costa.

1.4.1 Sistemas de extracción de energía de las olas localizados sobre la costa: Columna de Agua Oscilante

Como su nombre lo indica la columna de agua oscilante u OWC (*Oscillating Water Column*) aprovecha el recurso energético de las olas mediante la oscilación del agua del oleaje en el interior de una cámara.

El principio de operación de la columna de agua oscilante fue inventado por el Prof. Yoshio Masuda y su primer uso fue en la iluminación de boyas de navegación de 60 W.

Cuando la ola penetra en la cavidad, aumenta la presión interior de la columna, ejerciéndose una fuerza sobre el aire encerrado que es obligado a pasar por una turbina. Finalmente una máquina de inducción acoplada a la turbina y conectada a la red proporciona la salida eléctrica. Por otra parte, el movimiento de retroceso de la ola hace que la presión disminuya lo que provoca que el aire vuelva desde la atmósfera para llenar el vacío resultante. En este caso la succión de aire hacia la cámara se realiza nuevamente a través de la turbina (Chozas 2008).

El mecanismo de funcionamiento del sistema OWC se presenta en la figura 1.6.

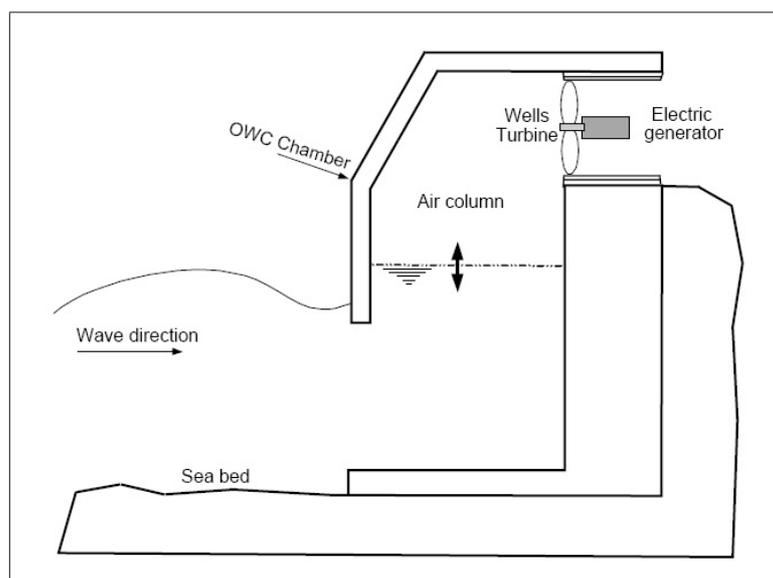


Fig. 1.6: Mecanismo de funcionamiento del sistema OWC (Chozas 2008)

Los dispositivos OWC presentan una eficiencia fuertemente dependiente de la frecuencia de las olas incidentes. Con geometrías optimizadas la eficiencia puede variar entre 10% y 90%.

Los prototipos OWC que se han construido desde el año 1976 son los siguientes:

- NEL : Fue proyectado en el año 1976 por el instituto escocés National Engineering Laboratory con una potencia nominal de 2 GW.

- Kvaerner: Fue construido en el año 1985 en la isla Toftestallen en Noruega con una capacidad de 500 kW. Funcionó hasta el año 1988.
- Mighty Whale: Se construyó en Japón en el año 1988. A diferencia de la mayoría de los dispositivos su estructura es flotante con una potencia de 110 kW.
- Sakata: Fue construido en Japón en el año 1990 como parte del rompeolas de un puerto con una potencia de 60 kW.
- Vishinjam: Fue construido en el Estado de Kerala en la India en el año de 1990 con una potencia de 150 kW.
- Osprey: Fue construido en el año 1992 con una potencia de 2 MW cerca de la costa escocesa. Fue destruido por las olas en el año 1996.
- OWC de Unión Fenosa: Fue construido en 1994 y está ubicado en la central térmica de Sabón en La Coruña, aprovechando la instalación hidráulica del sistema de refrigeración de uno de los condensadores de la central.
- Pico Azores: Está ubicado en la isla de Pico del Archipiélago de las Azores con una potencia de 400 kW. El dispositivo fue desarrollado por el Instituto Superior Técnico de Lisboa en Portugal.
- LIMPET 500 y su predecesor: La isla de Islay, situada al oeste de Escocia, ha albergado dos proyectos importantes de OWC. En 1991 se puso en funcionamiento el prototipo de 75 kW desarrollado por la Universidad de la Reina de Belfast cuyo desmantelamiento se realizó en 1999. El sucesor de este prototipo, el LIMPET de 500 kW, fue desarrollado por la empresa irlandesa Wavegen Ltd y por la Universidad de la Reina e instalado en el año 2000.
- Energetech OWC: Fue desarrollado por la empresa australiana Energetech e instalada en el año 2005 con una potencia de 500 kW.
- Mutriku: Mutriku es un pueblo costero situado en el extremo occidental de la costa de Guipúzcoa que alberga en sus aguas el segundo proyecto español de energía de las olas que se ha decidido acometer en las aguas del Cantábrico. Mientras que en Santoña se aprovecha el potencial del oleaje con la tecnología de las boyas, el proyecto Mutriku está

basado en la columna de agua oscilante. La planta ha sido promovida por el Gobierno Vasco y el Ente Vasco de la Energía EVE. La construcción de la planta de 296 kW comenzó en el año 2005, a cargo de Wavegen Ltd.

1.4.2 Sistemas de extracción de energía de las olas localizados cerca de la costa: Wave Dragon

El sistema Wave Dragon fue desarrollado por un grupo de compañías lideradas por Wave Dragon ApS de Dinamarca. Este dispositivo utiliza un diseño reflector que concentra las olas en dirección a una rampa para llenar un reservorio ubicado a un nivel mas alto. La electricidad se produce cuando el agua del reservorio desciende por un conducto que mueve una turbina acoplada a un generador. El sistema se presenta en la figura 1.7.

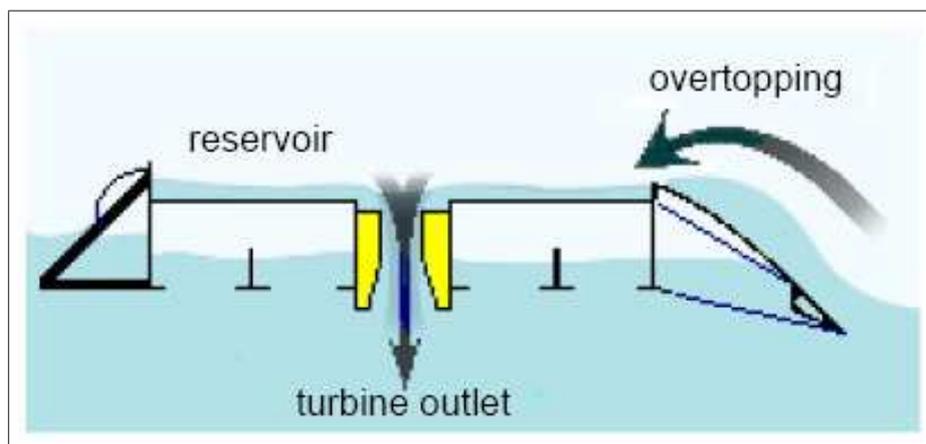


Fig. 1.7: Mecanismo de funcionamiento del sistema WaveDragon (Rodrigues 2005)

Desde 1998 el desempeño de este sistema ha sido optimizado a través de modelación numérica y de mediciones en tanques experimentales. Las mejoras se han enfocado en el diseño del reflector y de la sección transversal de la rampa. Con el apoyo de la Autoridad de Energía Danesa y de la Comisión Europea se instaló un prototipo en el 2003 en Nissum Bredning conectado a la red eléctrica del norte de Dinamarca. Actualmente se está enfocando la investigación en el desarrollo de una unidad múltiple de generación de 77 MW. El proyecto que lidera la Comisión Europea comenzó en el año 2006 y tiene como objetivo el desarrollo de un prototipo comercial (Rodrigues 2005).

1.4.3 Sistemas de extracción de energía de las olas localizados lejos de la costa: Pato de Salter, Pelamis, Cilindro de Bristol

El sistema pato de Salter

Uno de los primeros sistemas para extraer energía mecánica de las olas fue inventado por el Profesor Stephen Salter de la Universidad de Edimburgo, Escocia, en el año 1970 en respuesta a la grave crisis del petróleo de esos años. En la figura 1.8 se muestra una sección transversal de este dispositivo. El sistema de Salter debe ser anclado al lecho marino, a unos 80 km de la costa, para que la cámara rote sobre su eje y así produzca el movimiento rotatorio mecánico que luego se convertirá en energía eléctrica. La conversión del movimiento de flote en energía eléctrica se dificulta cuando las oscilaciones del mar son lentas. A pesar de ser el sistema mas eficiente inventado hasta ahora, nunca ha sido implementado debido a su complejo sistema hidráulico que hace costosa y arriesgada la inversión para un sistema a plena escala.

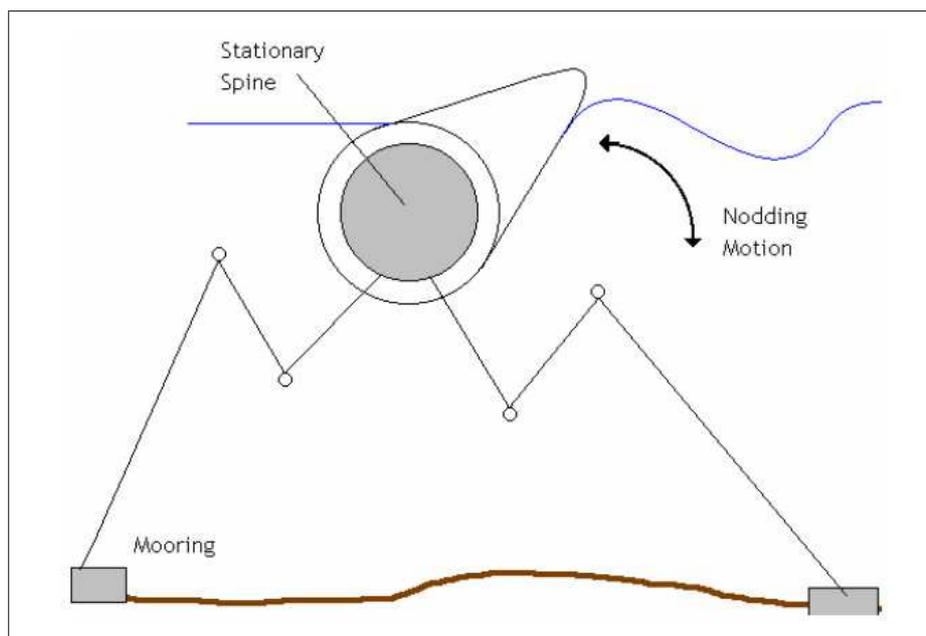


Fig. 1.8: El sistema pato de Salter
(Rodrigues 2005)

El sistema Pelamis

El convertidor de energía de las olas Pelamis fue inventado en Escocia y consiste de cuatro cilindros articulados de 3.5 m de diámetro y 30 metros de longitud que hacen de flotadores y tres cilindros articulados de 3.5 metros de diámetro y 5 metros de longitud que son las unidades generadoras de energía. Esta estructura, con 140 metros de longitud total, es colocada anclada

y semisumergida en aguas profundas como se muestra en la figura 1.9.



*Fig. 1.9: El sistema Pelamis
(Rodrigues 2005)*

Debido al oleaje el Pelamis realiza un movimiento serpenteante de arriba a abajo y de lado a lado. Este movimiento se transmite a un sistema hidráulico que a su vez mueve los generadores eléctricos. Cada uno de los módulos de potencia es capaz de generar 250 kW para un total de 750 kW.

El cilindro de Bristol

El cilindro de Bristol consiste de un cilindro flotante que recoge el movimiento de las olas. El cilindro está mecánicamente conectado a una unidad de energía mediante un sistema mecánico formado por palancas y uniones flexibles. Las uniones se mueven lentamente siguiendo el movimiento del cilindro permitiendo así la transferencia de energía al eje de la unidad convertidora. La unidad convertidora se encuentra ubicada sobre el lecho marino sobre la misma estructura que sirve de anclaje. En la figura 1.10 se muestra el sistema cilindro de Bristol.

1.4.4 Sistemas de extracción de energía de las olas localizados lejos de la costa de generación directa lineal: AWS, Upsala, PowerBuoy, WaveBob

La generación directa en la conversión de energía de las olas es similar a la generación directa de la energía eólica en donde se acopla el generador eléctrico al sistema de absorción sin el uso de dispositivos mecánicos intermedios. Se puede usar como sistema de generación de

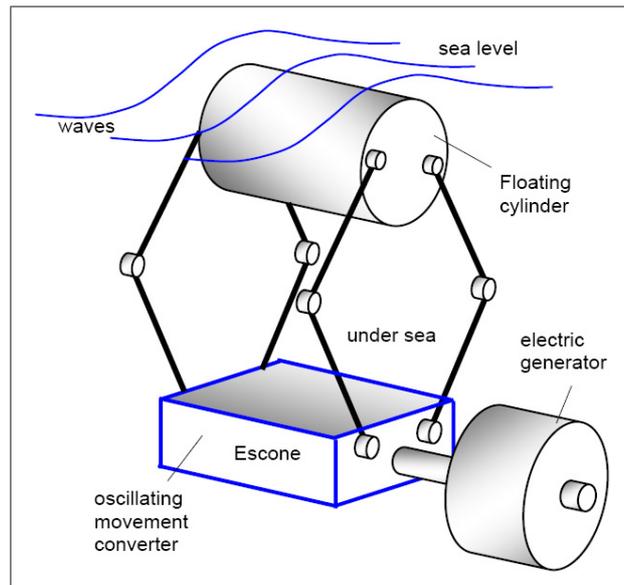


Fig. 1.10: El sistema cilindro de Bristol (Rodrigues 2005)

electricidad en estos dispositivos máquinas rotatorias o máquinas lineales como se muestra en la figura 1.11.

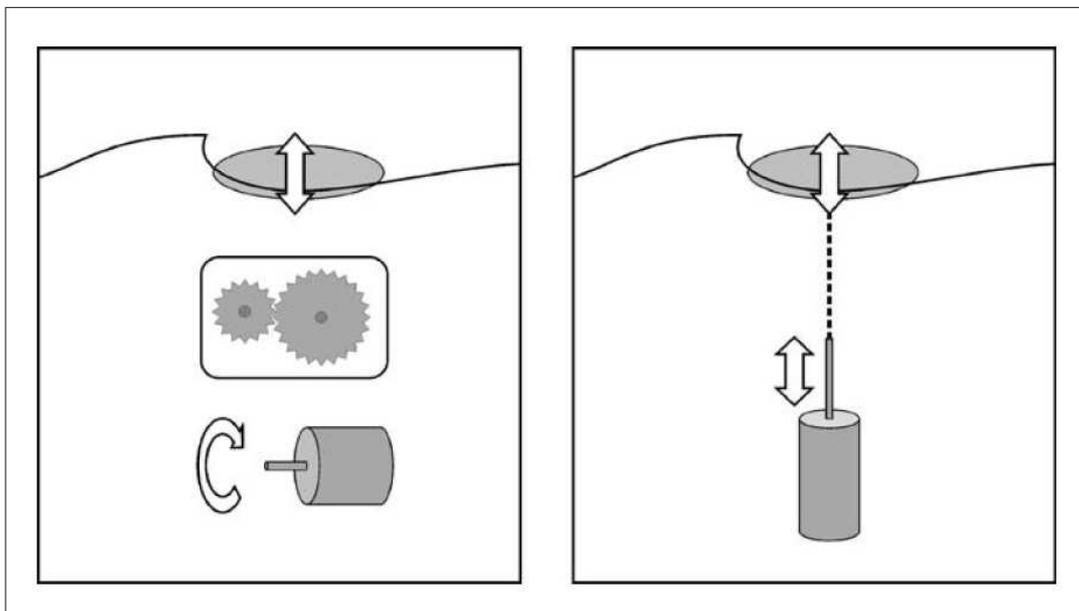


Fig. 1.11: Sistema de extracción directa rotatorio y lineal (Cruz 2008)

El accionamiento directo mediante la generación lineal se está empleando en los convertidores de energía de las olas como alternativa a los accionamientos indirectos, donde se utilizan sistemas de bajo rendimiento junto con multiplicadores para la conversión del movimiento alternativo en movimiento rotativo. Los generadores lineales se definen como aquellos generadores

que extraen energía en forma de movimiento oscilante de vaivén a velocidad reducida. Con esta velocidad se puede crear energía eléctrica de baja frecuencia que necesitará ser procesada por dispositivos de electrónica de potencia para ser conectada a la red. Generalmente los generadores lineales se construyen con un magneto permanente consolidado a la parte móvil de la máquina. Este magneto genera el campo rotórico necesario para la generación de electricidad.

Las partes que conforman a un generador lineal se ilustran en la figura 1.12. El dispositivo está formado por una parte móvil llamada convertidor sobre el cual se montan los magnetos con polaridad alternante. El convertidor se mueve linealmente cerca de un estator estacionario que contiene bobinas formadas de espiras conductoras. Entre el convertidor y el estator existe un entrehierro que sirve de medio para que se induzca tensión en los arrollados estáticos debido al campo magnético que cambia con el movimiento del convertidor.

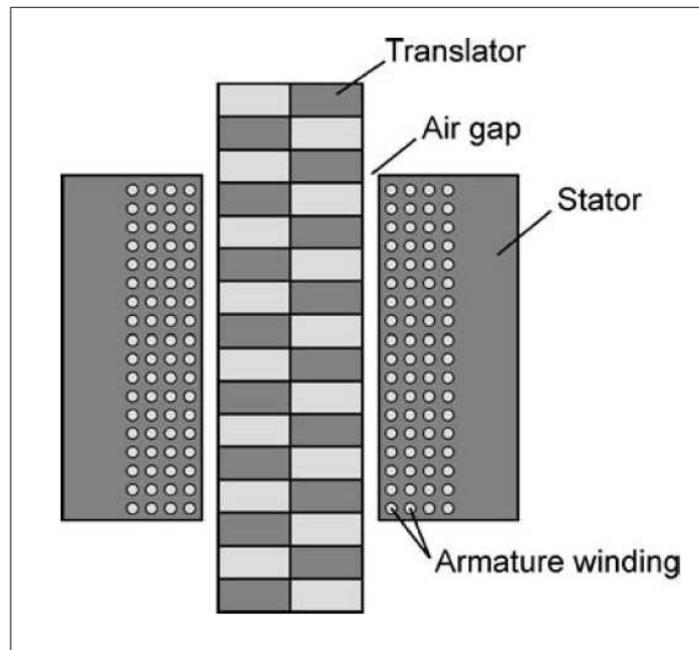


Fig. 1.12: Generación lineal
(Cruz 2008)

Se han diseñado un gran número de dispositivos de generación directa lineal a lo largo de los últimos años. En su mayoría estos dispositivos envuelven un punto de absorción y un sistema de referencia en donde el movimiento relativo entre los dos produce la generación. En la figura 1.13 se presentan los principales sistemas usados en la generación directa lineal. Los tres primeros (a,b,c) representan sistemas de puntos de absorción flotante con diferentes estructuras de referencia: referencia anclada al suelo marino, referencia flotante y referencia sumergida de disco amortiguador. Mientras que el último (d) es un sistema de punto de absorción sumergido

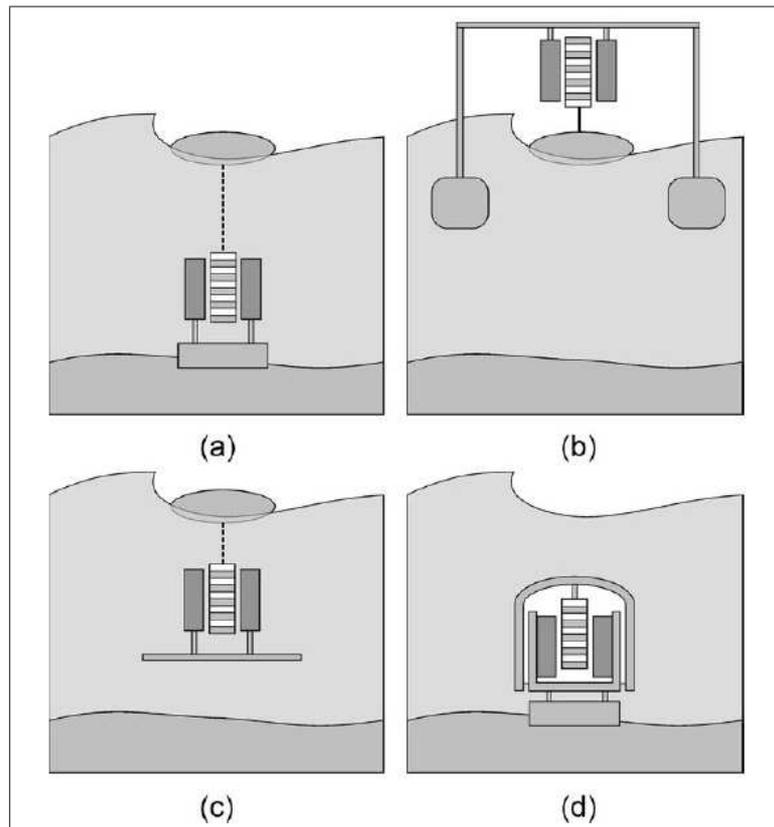


Fig. 1.13: Sistemas de extracción de energía de las olas lineales
(Cruz 2008)

con la referencia anclada al suelo marino.

Sistema con punto de absorción sumergido y referencia anclada al suelo marino: El oscilador de la ola de Arquímedes

El oscilador de la ola de Arquímedes o *Archimedes Wave Swing* (AWS) es un cilindro semi-sumergido con forma de boya anclado al lecho marino a seis metros por debajo de la superficie del océano. El oleaje mueve el casco superior que está lleno de aire en contra de la parte baja del cilindro que está fija. Con el movimiento ascendente y descendente se mueve un generador de electricidad.

La idea original del oscilador de la ola de Arquímedes pertenece a Hans Van Breugel y Fred Gardner. Ambos trabajaron en un diseño a escala 1:20 desde 1993 con la empresa holandesa de investigación y desarrollo Teamwork Technology B.V. En el año 2004 AWS Ocean Power, una empresa de energías marinas renovables, compró los derechos de propiedad del dispositivo y es quien actualmente lo desarrolla. La empresa tiene su sede en Ross-Shire, cerca de Inverness, capital del condado escocés de Highland.

A finales del año 2007 la empresa comenzó a recibir financiamiento de la británica Carbon Trust como parte de un programa que impulsaba el desarrollo de tecnologías independientes del carbón.

En la figura 1.14 se muestra el sistema AWS.

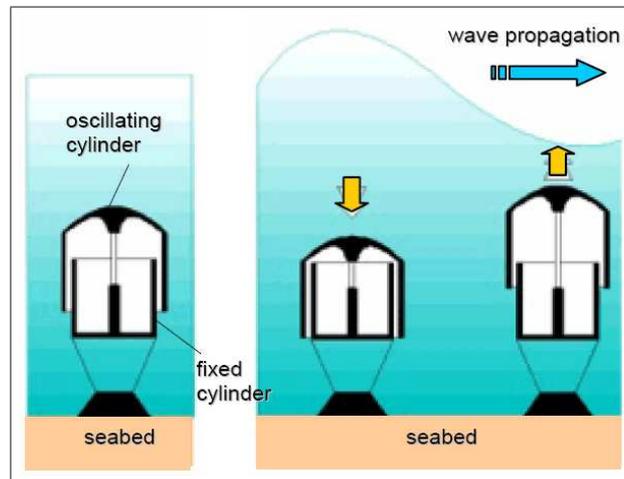


Fig. 1.14: El oscilador de la ola de Arquímedes (Rodrigues 2005)

La extracción de energía del AWS se puede realizar mediante un generador lineal o con un sistema hidráulico acoplado a un generador convencional. Se ha calculado que la energía anual obtenida por el generador es 8.55 GWh aunque deben considerarse algunas limitaciones. Se debe tener en cuenta que muchas olas provocan que la velocidad y el desplazamiento del dispositivo sean mucho mayores a los valores máximos admisibles. En estas ocasiones el generador aumenta su fuerza para reducir la magnitud de estos parámetros a 2.2 m/s y 7 m. respectivamente. Esto hace que la energía anual se reduzca a 2.79 GWh con lo que se concluye que aumentos en la velocidad y en el desplazamiento implican mejoras del rendimiento. Por otra parte el sistema mecánico de amortiguadores hidráulicos disminuye el rendimiento en un 30%. Por último se debe comentar que en las estimaciones se ha asumido la condición de resonancia perfecta pero dado que la frecuencia del oleaje cambia permanentemente debe considerarse este aspecto en las estimaciones del rendimiento.

El primer dispositivo AWS a escala fue remolcado de Rumanía hasta la costa de Portugal en el año 2001 para su puesta en funcionamiento. Desafortunadamente las pruebas tuvieron que ser suspendidas por motivos de estabilidad. En el año 2004 se sumergió el prototipo a escala real de 2 MW de potencia pico y 1 MW de potencia media a 5 km de distancia de la costa de Oporto. En la figura 1.15 se muestra el sistema AWS antes de ser sumergido.



Fig. 1.15: El oscilador de la ola de Arquímedes antes de ser sumergido en las aguas de Portugal

Sistema con punto de absorción flotante y referencia anclada al suelo marino

- Sistema de la Universidad de Upsala en Suecia: Este dispositivo ha sido desarrollado por la División de Electricidad de la Universidad de Upsala en Suecia y probado sobre la costa oeste de ese país en la primavera de 2006. Consiste de una boya flotante acoplada con un eje al convertidor del generador lineal. El generador es colocado sobre el suelo marino y la tensión en el eje es mantenida a través de un resorte sobre el cual descansa el convertidor. El generador lineal usado es de magneto permanente de 100 kW. El generador lineal es de geometría octogonal que da una uniforme distribución de esfuerzos entre el estator fijo y el pistón (Cruz 2008). En las pruebas sobre la costa norte de Suecia se midieron continuamente los voltajes sobre las cargas así como la potencia. La posición y la velocidad del convertidor puede ser determinada usando la fase de las tensiones sabiendo que dos cruces por cero sucesivos corresponde al movimiento del convertidor de un polo a otro. El dispositivo de Upsala optimiza el precio, los costos por mantenimiento y el impacto ambiental. En la figura 1.16 se presenta un diagrama esquemático de este dispositivo.

Sistema con punto de absorción flotante y referencia sumergida

- Sistema PowerBuoy desarrollado por Ocean Power Technologies OPT: El dispositivo PowerBuoy es unidad capaz de generar 40 kW de potencia y puede ser instalada en arreglos de varias unidades para generar cientos de MW. (CRES 2006). En la figura 1.17 se

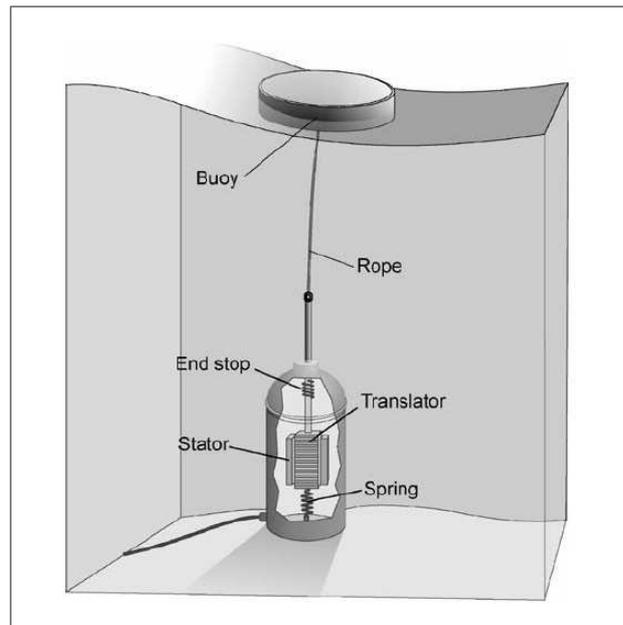


Fig. 1.16: Sistema de Upsala
(Rodrigues 2005)

presenta un diagrama esquemático de este dispositivo. En los eventos climatológicos que producen gran oleaje el sistema automáticamente se bloquea y cesa la generación de electricidad. Cuando la altura de las olas vuelve al nivel normal el sistema se desbloquea y comienza nuevamente la conversión de energía y la producción de electricidad. Desde 1997 ha sido evaluado en pruebas bajo el agua en los océanos pacífico y atlántico. En junio de 2004 y octubre de 2005 se desplegaron unidades de 40 kW fuera de las costas de Hawai para alimentar las bases navales y cerca de Atlantic City en New Jersey. A comienzos del 2006 la compañía inicio la primera fase de la construcción de un parque undimotriz de 1.25 MW fuera de la costa norte de España. El proyecto se llevó a cabo con la compañía Iberdrola. Adicionalmente, un sistema de generación undimotriz de 10 MW. se ha planificado para ser instalado en el Reino Unido. En la gráfica 1.18 se presenta la PowerBuoy a ser instalada en Santoña. Una demostración interesante del dispositivo se encuentra en la página web <http://www.oceanpowertechnologies.com/tech.htm>.

- Sistema Wavebob : Este dispositivo ha sido desarrollado por la empresa Wavebob Ltd del Reino Unido. El sistema de extracción de potencia del Wavebob es modular y esta diseñado para operar con poco mantenimiento. Cada unidad contiene tres alternadores de 0.5 MW arrojando una salida de potencia total de 1.5 MW. El dispositivo está diseñado para operar en aguas de 70 metros de profundidad como las del Atlántico Norte de Europa

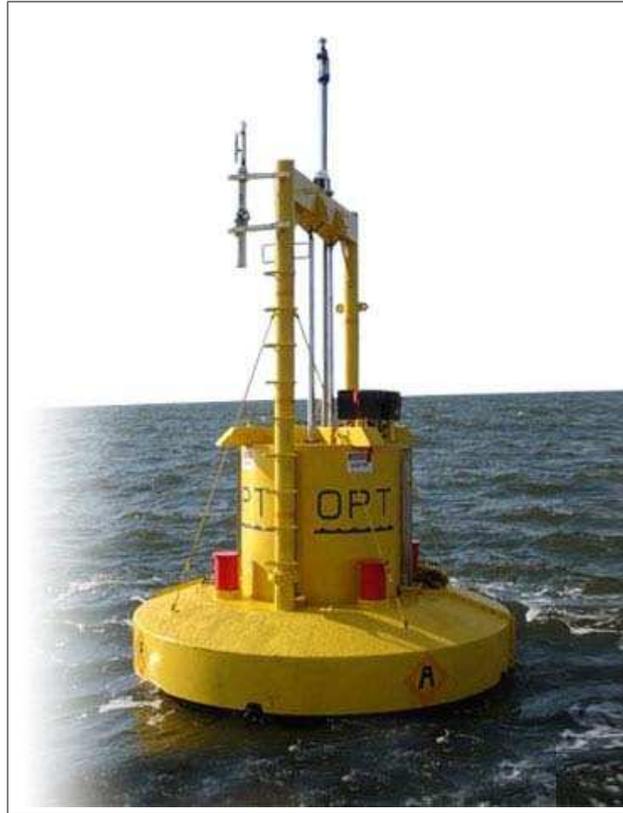


Fig. 1.17: Sistema PowerBuoy de OPT
(CRES 2006)



Fig. 1.18: La boya PowerBuoy antes de ser instalada en Santoña
(PowerBuoy 2009)

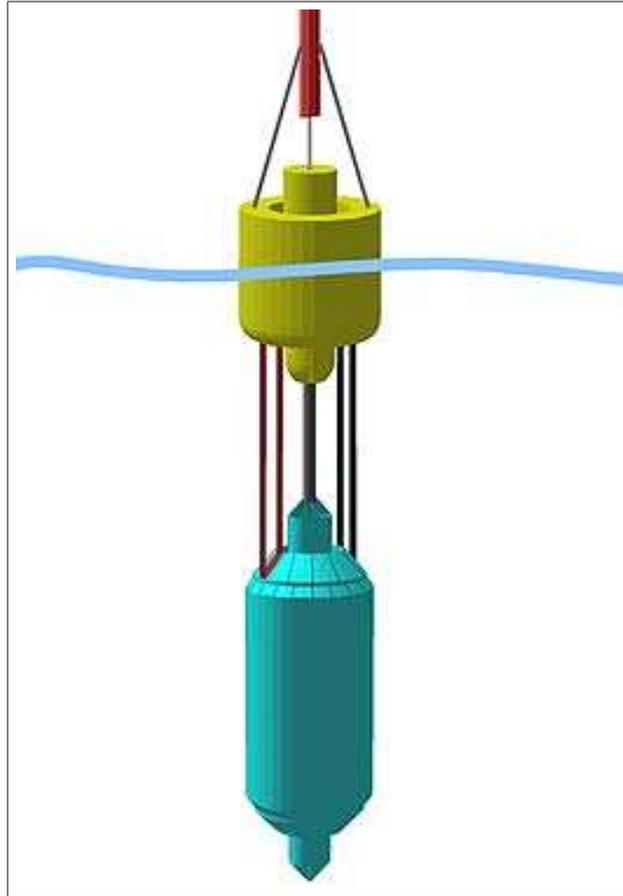


Fig. 1.19: Sistema Wavebob
(CRES 2006)

occidental. Se puede utilizar este dispositivo en arreglos de varias unidades para generar decenas de MW. En años recientes el diseño del Wavebob ha sido analizado con modelos de simulación en el dominio del tiempo y de la frecuencia. En la actualidad un prototipo a escala (1:4) está siendo evaluado en la bahía de Galway en el norte de Irlanda. Uno de los objetivos de esta evaluación es la verificación de los modelos en el dominio del tiempo con el fin de explorar alternativas que mejoren el rendimiento del dispositivo. En la figura 1.19 y 1.20 se muestra el sistema Wavebob.

1.5 La Energía de las Olas en Europa

Dinamarca, Holanda, Noruega, Portugal, Reino Unido y Suecia han considerado la energía de las olas como una fuente energética viable desde hace tiempo. La gran disponibilidad del recurso en todos estos países ha llevado a gobiernos y empresas a impulsar importantes programas de investigación y desarrollo. Por esto, desde hace 30 años ha habido un progreso significativo en las tecnologías de conversión. En la actualidad el país dominante en todo lo concerniente a la



Fig. 1.20: Dispositivo Wavebob en altamar
(CRES 2006)

energía undimotriz es el Reino Unido, y le siguen, aunque a cierta distancia, Portugal, España y Dinamarca (Chozas 2008). A continuación se describe brevemente las actividades de los países mas relacionados con la energía de las olas.

- Dinamarca: El potencial energético en el noroeste del Mar del Norte es muy grande. Se estima una potencia anual de 30 TWh y entre 7 y 24 kW/m de frente de ola que llega de la dirección oeste. Ha desarrollado varios dispositivos de olas pero el mas importante sigue siendo el Wavedragon.
- Irlanda: Se estima una potencia anual de 187.5 TWh y 375 MWh/m de frente de ola. Un conjunto de universidades, centros de investigación y empresas comenzaron en el año 2002 dos estudios: el primero de ellos era sobre métodos de elección de emplazamientos para aprovechar la energía undimotriz y, el segundo para predecir el estado de las olas.
- Noruega: En su larga costa que da a la cara este del Océano Atlántico predominan los vientos del oeste que le permiten disponer de una potencia anual de 400 TWh. No obstante, se ha determinado que en el año 2020 sólo 0.5 MWh de la energía tendrá su origen en las olas. La política energética de Noruega ha estado siempre basada en la energía

hidroeléctrica, pero la presión social no ha permitido que fuera esta fuente energética la que hiciera frente a los aumentos de la demanda. De esta manera, Noruega ha apostado por la energía eólica y la biomasa, y ha impulsado el hidrógeno para almacenamiento de energía. En 1980 se desarrollaron dos convertidores de olas muy importantes diseñados para trabajar en la costa: la columna oscilante de agua multi-resonante (OWC), de 500 kW situada en la costa de Kvaerner, y el Tapered Channel, más conocido como sistema TAPCHAN, de 350 kW. Ambas plantas se dañaron tremendamente en unas tormentas ocurridas en 1988 y 1991.

- Portugal: Se caracteriza por tener un potencial anual que varía entre 30 y 40 kW/m. concentrado principalmente en la zona noroeste de la costa de Portugal y en el Archipiélago de las Azores. Ambos emplazamientos ya han sido elegidos para construir los parques de olas. Uno de ellos, en Agucadoura, utiliza la tecnología Pelamis y el otro, situado en la costa de la isla de Pico en las Azores, utiliza un convertidor OWC. La política de Portugal de estimular la investigación y el desarrollo en las empresas de energía de las olas ha sido notable, y por ello muchas de las empresas de este sector se han situado allí. Se ofreció una tarifa indexada (variable, ligada al precio de la inflación) de 223.5 cEuro por kWh, durante doce años, a los proyectos de energía undimotriz, limitada a los primeros 20 MW de generación.
- Reino Unido: En sus aguas normalmente tormentosas, prevalece el viento del oeste, por lo que se puede entender que el mayor potencial se encuentre en la costa oeste, principalmente en Escocia. Se calcula una disponibilidad energética de 120 GW o de 50 TWh por año, lo que representa 1/7 del consumo eléctrico del país. Es uno de los países con mayor potencial de energía undimotriz y mareomotriz: quizá sea este el motivo por el que se le considera como el líder mundial de estas energías desde el año 2004, aunque en sus políticas haya favorecido a la energía eólica considerándola la energía más económica. Su interés por la energía de olas se remonta a antaño cuando, en 1974, S. Salter comenzó la investigación sobre el dispositivo Pato de Salter. Más recientemente, en el año 2003, ya había instalados tres dispositivos en la costa oeste de Escocia que suministraban energía a la isla de Islay y a Shetland. Estos dispositivos son el Limpet, el Pelamis y el *Floating Wave Power Vessel* (FWPV). Además, se ha previsto la instalación de un parque de olas cada año para alcanzar una potencia instalada de 14.7 MW. Esta medida proviene de la iniciativa gubernamental de que en el año 2010 el 10% de la energía generada sea de

origen renovable.

- Suecia: Los lugares con mayor densidad energética se encuentran en la parte norte de la costa oeste de Suecia, en el Mar del Norte, y en el Mar Báltico alrededor de las islas de Oland y Gotland, con un valor medio de 5-10 TWh por año, que bien merece ser comparado con el valor de la demanda de electricidad anual, de 150 TWh. En 1980 se instaló en Gotemburgo, en la costa oeste de Suecia, el primer punto de absorción a escala real del mundo, conocido con el nombre IPS. Otro proyecto de gran envergadura ha sido el dispositivo Hose-Pump, un tubo flexible cuyo volumen interno varía, conectado a un flotador.
- Francia: El Golfo de Gascuña es el más rico en energía de las olas, con unos niveles de potencia anuales mayores que 40 kWh/m ó 28 GW. La Escuela Central de Nantes ha participado en la planta piloto de la isla de Pico, donde se dedica principalmente a las estrategias de control del dispositivo OWC.
- Grecia: Su costa supera los 16000 km de longitud, correspondientes al Mar Jónico y al Mar Egeo. En este último, el potencial eólico es de dirección norte-sur y provoca oleaje con un valor entre 4-11 kW/m. Los parques de olas son particularmente atractivos para suministrar electricidad a un gran número de islas que están alimentadas en la actualidad con centrales diesel.
- Italia: Su enorme línea de costa en relación con la superficie del país invita a pensar que esta energía sería un recurso conveniente, sin embargo, el potencial no llega a 5 kW/m de línea de costa. Únicamente en Sicilia y en Cerdeña esta magnitud aumenta a 10 kW/m. En la Universidad de Roma se ha desarrollado un nuevo dispositivo, muy apropiado para zonas cerradas y con olas moderadas, que utiliza un convertidor giroscópico flotante. Consiste en una turbina flotante de tipo Kobold que mueve un alternador, a la que se conoce con el nombre de ENERMAR. En el año 2002 se construyó un prototipo de 130 kW (la turbina tenía un diámetro de 6 m) para instalarlo 1.5 km mar adentro de Mesina, ciudad italiana situada en el ángulo nordeste de Sicilia.

1.6 La Energía de las Olas en Otros Países no Europeos

Algunos países no europeos también están llevando a cabo programas de investigación y desarrollo como por ejemplo Australia, Canadá, China, India, Indonesia, Israel, Japón, México,

Rusia, Sri-Lanka y Estados Unidos.

Curiosamente, el recurso de olas en algunas zonas de Australia es mucho mayor que la demanda de electricidad de dichas regiones. Empresas importantes como Energetech y Ocean Power Technologies están desarrollando varios proyectos allí.

En Vizhinjam (India) se construyó en 1990 una planta de pruebas de 150 kW y se han desarrollado convertidores de tipo OWC, *Backward Bend Duct Buoy* (BBDB) y dispositivos flotantes.

Japón, una isla con una línea de costa de 35000 km, depende energéticamente de las importaciones de combustibles fósiles. Por este motivo, está considerando la energía de las olas como una posible fuente energética. En 1988 construyó una primera planta con dispositivo OWC flotante y años más tarde otra de 60 MW.

Estados Unidos empezó su programa de investigación y desarrollo a principio de los 50, pero su interés por esta energía tiene un papel secundario. Han desarrollado dos proyectos importantes: McCabe Wave Pump (desarrollado inicialmente para producir agua potable por ósmosis pero que también permite la producción de electricidad) y el dispositivo boyante de OPT.

1.7 La Energía de las Olas en España

En 1979 el Ministerio de Industria y Energía (actual Ministerio de Industria, Turismo y Comercio) estableció un potencial energético en las costas españolas de 37650 MW aproximadamente, 25 kW/m en las costas del Océano Atlántico y 11 kW/m en las del Mar Mediterráneo. Las regiones españolas donde el potencial energético es mayor son la costa Cantábrica y las Islas Canarias, donde la potencia media anual es 20 kW/m.

El potencial energético medio en la costa y en aguas someras varía entre 3 y 5 kW/m y en mar adentro entre 10 y 16 kW/m, que se debe, como se ha indicado antes, a que el potencial energético de las olas disminuye a medida que el frente de olas se acerca al litoral.

El primer convertidor de energía de olas que se instaló en España fue en una central térmica de Sabón (La Coruña). El proyecto, llevado a cabo por Unión FENOSA, consistía en un dispositivo de columna de agua oscilante.

Actualmente se están llevando a cabo dos proyectos de gran importancia. El primero de ellos es un parque de energía undimotriz en Santoña (Cantabria), que utiliza la tecnología OPT o PowerBuoy, y el segundo, situado en Mutriko (Guipúzcoa), utiliza un sistema de columna de

agua oscilante integrado en un dique de abrigo o rompeolas con lo que se consigue un impacto ambiental menor.

Además de los dos proyectos anteriores, se han desarrollado dos dispositivos muy interesantes: Ceflot y la boya Arlas Invest. El primero de ellos es similar a una boya gigante situada mar adentro. La novedad del proyecto es que la energía eléctrica obtenida es aprovechada en el mismo lugar de la generación para producir hidrógeno. El segundo proyecto también se trata de una boya, que aprovecha el efecto yo-yo del cable que la une con el fondo marino para generar electricidad. Como en el resto de países, la evolución de la energía marina en España debe ser respaldada por las Administraciones, debido al alto costo de la inversión que lleva aparejado su desarrollo. España goza de un potencial de energía de las olas enorme, acorde con la longitud de su línea de costa.

La información sobre los desarrollos tecnológicos de la energía de las olas fue tomado de la tesis de Chozas de la Universidad Politécnica de Madrid (Chozas 2008).

1.8 Costos de la Generación Undimotriz

El precio de la electricidad generada con parques de olas ha mejorado mucho en los últimos 25 años. Aun así los costos de esta energía son altos, como revelan los datos publicados por la Comisión Europea (Tabla 1.1) en relación a los costos de la conversión de la energía de las olas (Wavenet 2003). Sin embargo, se estima que en unos años el costo de esta energía sea comparable al de la energía eólica.

Tab. 1.1: Costos de la generación undimotriz

Año	Costo Inst.(Euro/kW)	Costo Elect.(Euro/kW)
2002	10000 - 20000	0.2 - 0.3
2006	5000 - 15000	0.1 - 0.2
2010	2000 - 10000	0.08 - 0.12
2020	1000 - 2000	0.03 - 0.05

En la gráfica 1.21 se muestra el precio de la electricidad generada con las distintas fuentes energéticas para el año 2002. Se observa que a futuro el precio de la energía undimotriz sería comparable con el resto de las energías renovables.

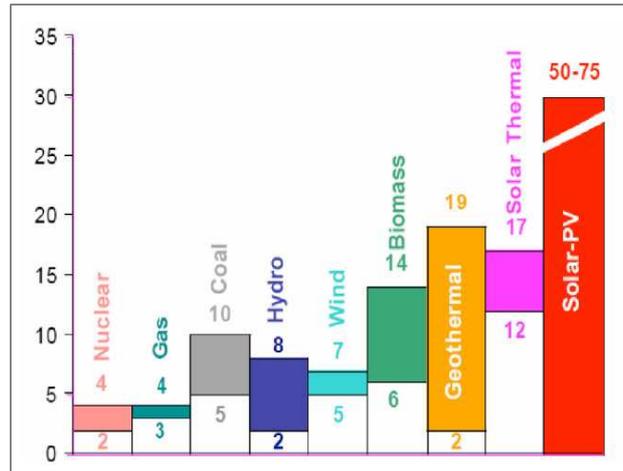


Fig. 1.21: Costos asociados a las energías renovables (cEuro/kW)
(Chozas 2008)

En España la energía de las olas está contemplada en el artículo 36 y 38 del Real Decreto RD 661/2007 (por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial), dentro del Grupo b.3. (instalaciones que únicamente utilizan como energía primaria la de las olas). Allí se especifican las siguientes tarifas y primas:

Tab. 1.2: Tarifas de la generación undimotriz

Plazo	Tarifa Reg.(cEuro/kW)	Prima Ref.(cEuro/kW)
Primeros 20 años	6.89	3.8444
A partir de entonces	6.51	3.0600