



EPSI, Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval

**TRABAJO DE FIN DE GRADO
CURSO 2017/2018
ESTUDIO DE LAS OLAS Y SU
APROVECHAMIENTO EN ENERGÍA
UNDIMOTRIZ**

Tutor: Antonio Ceferino Bermejo Díaz.

Alumno: Román Martínez Aneiros.

Grado: Náutica y Transporte Marítimo

RESUMEN

Energía Undimotriz

La energía undimotriz, u olamotriz, es la energía que permite la obtención de electricidad a partir de energía mecánica generada por el movimiento de las olas. Es uno de los tipos de energías renovables más estudiada actualmente, y presenta enormes ventajas frente a otras energías renovables debido a que en ella se presenta una mayor facilidad para predecir condiciones óptimas que permitan la mayor eficiencia en sus procesos. Es más fácil llegar a predecir condiciones óptimas de oleaje, que condiciones óptimas en vientos para obtener energía eólica, ya que su variabilidad es menor.

Principio de Funcionamiento:

La obtención de energía se obtiene por medio de varios equipos entre los cuales se destaca el Pelamis el cual, utilizan el choque de las olas, moviéndose y generando energía eléctrica.

Ventajas:

- Es una fuente renovable
- Es un combustible limpio
- No destruye el medio ambiente
- Las olas y las mareas son predecibles.
- No se requiere de combustible, por lo que su costo es bajo.
- No produce gases de efecto invernadero.
- No representa graves riesgos de seguridad para las personas que trabajan en la generación de ésta energía.

Desventajas:

Todavía falta investigación en el tema por lo que requiere más inversión económica.

- Puede afectar el sector turístico y bienes raíces de las playas, ya que las playas se convertirían en las zonas de impacto de la aplicación de estas tecnologías.

- Puede interferir con el amarre y anclaje de las líneas de pesca comercial y deportiva.
- Las olas pueden ser grandes o pequeñas por lo que no siempre se podrá generar electricidad.
- Se necesita aplicar un sistema que conduzca la electricidad hacia tierra firme, sin que cause daños al medio ambiente.
- Se cree que el aprovechamiento de onda o energía de las mareas finalmente se reduce la velocidad de rotación del planeta.

SUMMARY

The wave energy is the energy that allows obtaining electricity from mechanical energy generated by the movement of waves. It is one of the types of renewable energies most studied today, and has several advantages in front of other renewable energies because it presents a greatest facilities to predict the optimal weather conditions that allow get better efficiency in their processes. It is easier predict optimum wave conditions for wave energy than optimal wind conditions to obtain wind energy because it's lower variability.

Operating principle.

The obtaining of energy is obtained by means of several equipment among which stands out the "Pelamisel" that uses the shock of waves to move and generate electrical energy.

Advantages:

- It is a renewable source.
- It is a clean energy.
- It doesn't destroy the environment.
- The waves and tides are predictable.
- Fuel is not required that's means the cost is low.
- It doesn't produce pollution gases.
- It doesn't present serious security risks for the people who work in the generation of this energy.

Disadvantages:

- There is still a lack of research on the subject which requires more economic investigation.

- It can affect tourism sector and beaches condition because the beaches would become the areas of impact of implementation of these technologies.
- It can interfere with the anchoring or working places of commercial and sport fishing lines.
- The waves can be high or small, so electricity can not always be generated.
- It is necessary to install a system that conducts the electricity at shore without damage the environment.

ÍNDICE

ÍNDICE DE IMÁGENES.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	10
1. Antecedentes y objetivos.....	11
1.1. Antecedentes.....	11
1.2. Objetivos.....	12
CAPÍTULO II: MEMORIA DESCRIPTIVA.....	13
2. Memoria descriptiva.....	14
2.1. Origen.....	14
2.2. Características y clasificación de olas.....	14
2.3. Potencial.....	24
2.4. Tecnologías: técnicas de conversión y transmisión.....	29
2.5. Conversores de energía del oleaje OWC.....	31
2.5.1. Características de los OWC.....	32
2.5.2. Conversión primaria.....	33
2.5.3. Conversión secundaria.....	33
2.6. Métodos de captación.....	33
2.6.1. Totalizadores o terminadores.....	34
2.6.1.1. OWC Columna Oscilante.....	34
2.6.1.2. OWC Rectificador Russel.....	35
2.6.1.3. OWCs Péndulo.....	36
2.6.1.4. OWC Unión Fenosa.....	37
2.6.1.5. OWC Tapchan (Noruega).....	37
2.6.2. Sistemas de bombeo.....	38
2.6.2.1. OWC Mecánico.....	38
2.6.2.2. OEC Bomba manguera.....	38
2.6.2.3. OWC Bomba de pistón.....	39
2.6.3. Sistemas Hidráulicos.....	41
2.6.3.1. OWC Duck o Pato Salter.....	41
2.6.3.2. OWC Raft o Balsa Cockerell.....	42

2.6.3.3. OWC Pelamis.....	43
2.6.3.4. OWC Rompeolas Sumergido.....	45
2.6.3.5. Sistema Alstom.....	46
CAPÍTULO III: COSTE E IMPACTO AMBIENTAL.....	49
3. Coste e impacto ambiental.....	50
3.1. Coste.....	50
3.2. Impacto ambiental.....	51
CONCLUSIÓN.....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	56

ÍNDICE DE IMÁGENES

- Figura 2.1:** Características de una onda senoidal pura
- Figura 2.2:** Superposición de ondas de un estado típico del mar
- Figura 2.3:** Alcance y marejada de fondo
- Figura 2.4:** Movimiento de las moléculas de agua en las olas
- Figura 2.5:** Divergencia y convergencia de las olas en la costa
- Figura 2.6:** Esquema conceptual del rompimiento de las olas en la costa
- Figura 2.7:** Fenómeno de reflexión
- Figura 2.8:** Fenómeno de difracción
- Figura 2.9:** Nivel energético del oleaje
- Figura 2.10:** Dispositivo de medida de las características del oleaje
- Figura 2.11:** Satélite para medir características del oleaje
- Figura 2.12:** Altura significativa de las olas
- Figura 2.13:** Distribución global de la energía de las olas en kW/m^2 de ancho de ola
- Figura 2.14:** Franja donde se encuentra la energía de una ola
- Figura 2.15:** Instalación de columna oscilante de agua (OWC)
- Figura 2.16:** Instalación real Islay-Escocia, 2001 (OWC)
- Figura 2.17:** Rectificador Russel
- Figura 2.17:** Rectificador Russel
- Figura 2.18:** Dispositivo Pendulor
- Figura 2.19:** Sistema diseñado por Unión Fenosa

Figura 2.20: OWC Tapchan

Figura 2.21: *OWC Mecánico*

Figura 2.22: OWC bomba de manguera

Figura 2.23: OWC Bomba de pistón

Figura 2.24: OWC Duck o Pato Salter

Figura 2.25: Movimiento de los flotadores bajo la acción de las olas

Figura 2.26: OWC Raft

Figura 2.27: OWC Pelamis

Figura2.28: Diseño del sistema Pelamis

Figura2.29: OWC Rompeolas sumergido

Figura 3.1: Evolución prevista del coste de la energía producida

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Ecuaciones que describen la velocidad de fase de una ola.

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES Y

OBJETIVOS

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.

El objetivo del presente trabajo fin de grado es la definición y clasificación de las olas; y su aprovechamiento como energía undimotriz mediante diferentes tecnologías.

1.1. ANTECEDENTES.

Uno de los problemas del mundo es la gradual disminución de las fuentes tradicionales de energía como el petróleo, gas y carbón. La combustión de importantes cantidades de estos recursos está produciendo severos efectos sobre el clima y resultan altamente contaminantes, esta es la razón por la cual en el futuro la humanidad necesitará de otras alternativas para obtener energía, estas fuentes serán la energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica.

Los océanos proveen de energía a partir de las mareas (mareomotriz) y de las olas marinas, más conocida como energía undimotriz. Todas estas son fuentes renovables y limpias. En términos globales el 94% de la producción de energía mundial proviene de fuentes no renovables. La energía de las olas aparece como una alternativa consistente basada en la energía que llevan las olas a lo largo de los océanos del mundo [1].

Esta forma de energía puede presentar un gran potencial como alternativa a las energías no renovables para la generación de energía eléctrica, en determinadas zonas dadas las características del clima y de la costa marítima.

La energía undimotriz o energía de las olas es un recurso renovable disponible en todo el mundo, con un potencial de energía estimado de 200 a 300 gigavatios (GW). Su disponibilidad en regiones densamente pobladas de Europa y América del Norte la convierten en una fuente innovadora y atractiva de energía renovable.

1.2. OBJETIVOS.

Los objetivos del presente trabajo fin de grado son:

- Origen de las olas.
- Clasificación y características de los tipos de olas.
- Potencial de las olas como energía undimotriz.
- Conocimiento de los tipos de dispositivos OWCs.
- Costes explotación de la energía undimotriz.
- Impacto ambiental.

CAPÍTULO II: MEMORIA

DESCRIPTIVA

2. MEMORIA DESCRIPTIVA.

2.1. ORIGEN.

Todo tipo de oscilación en la superficie de agua que sea periódica se le denomina ola. Las olas de los océanos son originadas por diversas causas. Entre estas causas se pueden señalar el viento, las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la Luna y el Sol sobre las masas oceánicas, los maremotos, las tormentas, etc.

Sin embargo, de todas ellas, el viento constituye el agente que genera las olas más comunes y de mayor densidad energética. Por ello, se suele decir que la energía que poseen las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar, ya que el viento se origina como consecuencia del desigual calentamiento que el Sol produce en la superficie terrestre, y el viento, al actuar sobre el agua del mar le transmite energía y la pone en movimiento, produciendo ondulaciones en las capas superficiales que constituyen el oleaje que se observa en todas las aguas de los océanos y que golpean las costas de los continentes.

En este sentido, se podría concluir que la energía de las olas oceánicas constituye una forma de almacenar en la superficie de los océanos, con una densidad relativamente alta, la energía solar [2].

2.2. CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE LAS OLAS

Los fundamentos de la clasificación de las olas parten de los mecanismos que intervienen en la interacción entre el viento y la superficie del mar para la generación de las olas, estos son complejos y aún no se explican en su totalidad.

En principio, el proceso puede resumirse de la siguiente forma: Cuando el viento sopla a través de la superficie del mar las moléculas de aire interactúan con las moléculas de agua que están en contacto. La fuerza que se genera entre el aire y el agua modifica la superficie del océano, dando lugar a pequeños rizos, conocidos

como olas de capilaridad. Las olas de capilaridad dan lugar a una mayor superficie de contacto, la cual incrementa la fricción entre agua y viento. Ello da lugar al crecimiento de la ola que, cuando ha alcanzado un cierto tamaño, facilita que el viento pueda ejercer una mayor presión sobre ella con el consiguiente incremento de la misma.

Las olas se caracterizan por su longitud de onda, L , altura de onda, H , y el periodo, T (figura 2.1). La longitud de onda es la distancia entre dos picos consecutivos; la altura de onda es la diferencia en altura entre un pico y un valle; y el periodo es el tiempo en segundos que tarda un valle o un pico de la ola en recorrer su longitud de onda [3].

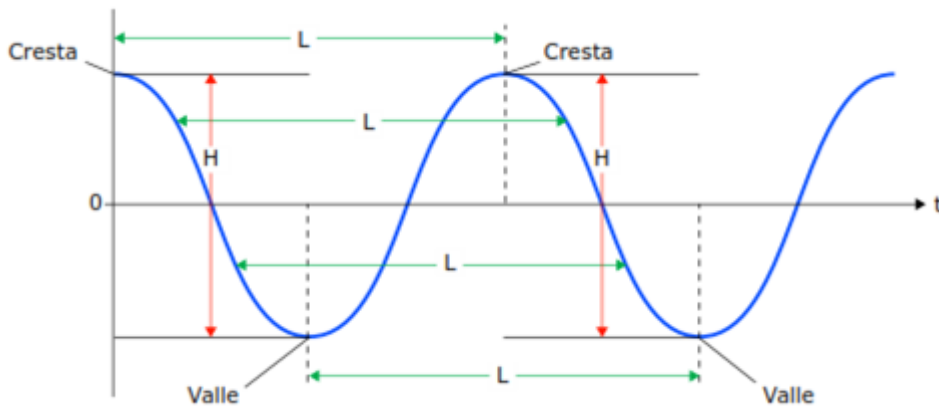


Figura 2.1: Características de una onda senoidal pura. [Fuente: <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=36740>]

La frecuencia f de la ola se define como el número de oscilaciones pico a pico (o valle a valle) de la superficie de la ola por segundo, visto por un observador fijo, y es el inverso del periodo, es decir, $f=1/T$. La velocidad c de propagación de una ola viene dada por el cociente entre la longitud L y el periodo T , es decir, $c=L/T$.

El tamaño de las olas generadas por un campo de viento depende de tres factores: La velocidad del viento; el tiempo durante el cual éste está soplando, y la distancia o alcance sobre la cual la energía del viento se transfiere al océano para formar las olas.

En realidad el océano no se compone de ondas senoidales puras, sino más bien son una superposición de muchas de ellas, cuya superficie puede ser reconstruida como suma de ondas de amplitud variable, llamada *análisis espectral*.

Por tanto, un estado típico del mar se compone de una superposición de ondas, cada onda con características propias, es decir, su propia velocidad, periodo, altura de onda, y dirección (figura 2.2). Es la combinación de estas ondas lo que se observa cuando se mira la superficie del mar. La envolvente de estas olas viaja a una velocidad distinta de la de las ondas individuales, se la denomina velocidad de grupo, c_g .

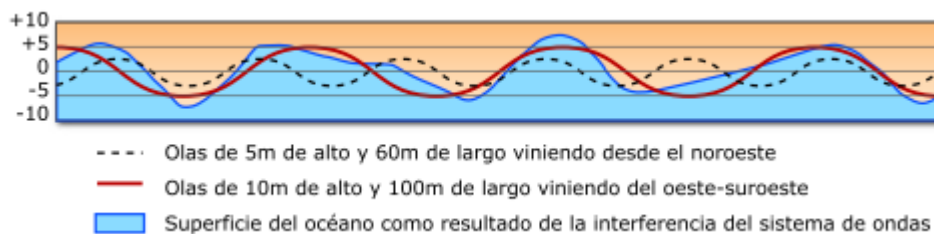


Figura 2.2: Superposición de ondas de un estado típico del mar [Fuente: <https://k31.kn3.net/taringa/C/9/6/E/3/4/helio3litio/640.jpg>]

Las olas situadas dentro o cerca de las áreas donde fueron generadas se denominan *olas tormentosas*. Estas forman un mar irregular y complejo. Sin embargo, las olas pueden viajar desde estas áreas con pequeñas pérdidas energéticas para producir grandes olas, a miles de kilómetros del punto donde se originaron.

Por tanto, es posible que existan olas en determinadas zonas del mar con ausencia de viento.

Una vez que las olas se alejan del área de generación, sus crestas son más lisas y menos caóticas. A este oleaje se le llama *marejada de fondo*. Estas olas se dispersan sobre la superficie oceánica con muy poca pérdida de energía (interacción entre ondas y fricción con corrientes marinas), aunque pierden altura, fundamentalmente por dispersión angular (figura 2.3).

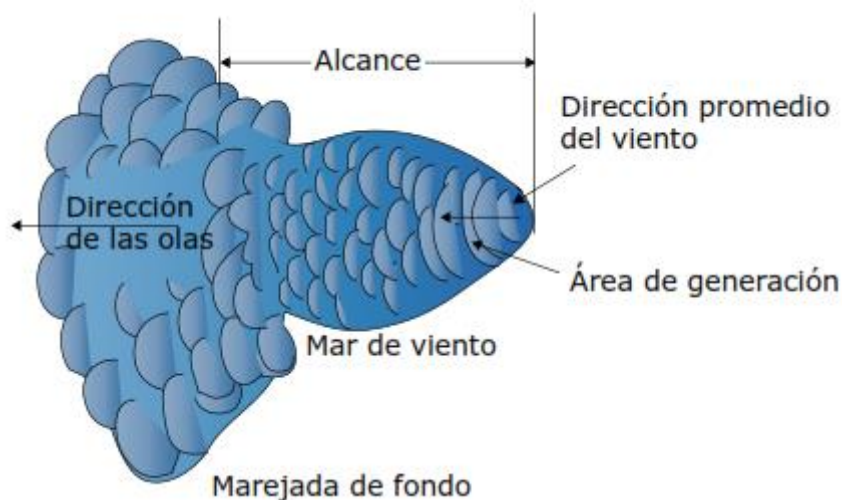


Figura 2.3: Alcance y marejada de fondo
 [Fuente:<http://energyprofessionalsymposium.com/img/1235/image855.jpg>]

Una ola oceánica en aguas profundas aparenta un imponente objeto en movimiento, una cresta de agua que viaja a través de la superficie del mar. Pero para entender la energía del oleaje es importante darse cuenta que esto no es así. Una ola oceánica es el movimiento de energía, pero el agua no se está moviendo de forma similar. En el océano, donde las olas mueven la superficie del agua arriba y abajo, el agua no se está moviendo hacia la orilla. En realidad su comportamiento es similar al de una soga que hacemos oscilar. Por tanto, una ola oceánica no representa un flujo de agua. Una ola representa un flujo o movimiento de energía desde su origen hasta su eventual rotura, la cual puede ocurrir en medio del océano o contra la costa.

La dirección de las olas que viajan en aguas profundas viene fijada por la dirección del viento que las generó. Por tanto, en una zona dada pueden llegar olas procedentes de distintos lugares y diferentes direcciones.

Como es de esperar, las olas resultantes son complejas. El perfil de la superficie de los océanos viene generado por las olas, sin embargo, es necesario entender la naturaleza de la parte sumergida de las olas, si se desean diseñar dispositivos que capturen su energía.

Las olas de los océanos están constituidas por moléculas de agua que se mueven formando círculos. En la superficie del agua, en zonas profundas, los movimientos

son del mismo tamaño que la altura de la ola, pero estos movimientos disminuyen exponencialmente en tamaño al descender debajo de la superficie.

El comportamiento de las olas depende en gran medida de la relación que existe entre el tamaño de las olas y la profundidad del agua donde ésta se está moviendo.

El movimiento de las moléculas de agua cambia de forma circular a elipsoidal cuando una ola llega a la costa y la profundidad del agua disminuye el movimiento es más horizontal (figura 2.4).

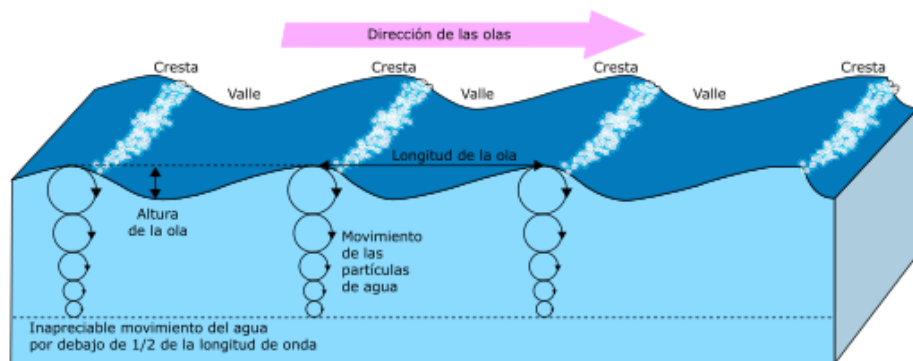


Figura 2.4: Movimiento de las moléculas de agua en las olas [Fuente <https://www.kn3.net/helio3litio/31-1-F-4-9-9-7-EB8-JPG.html>]

La velocidad c de las olas en aguas poco profundas depende de la profundidad ($c = \sqrt{gh}$), por tanto, la porción de la ola que está viajando sumergida, viaja más rápido.

Realmente la velocidad de grupo en agua profunda es menor que la velocidad de las componentes que la forman. Es decir, la envolvente siempre va rezagada con respecto de las ondas individuales. Por eso se dice que las ondas en el agua profunda viajan por paquetes de energía. En agua somera o poco profunda la velocidad de grupo se hace igual a la velocidad de fase de la onda, es decir, $c_g=c$.

Esto origina que las olas vayan cambiando gradualmente su velocidad de propagación y su dirección conforme se aproximan a la costa. A este comportamiento se le denomina *refracción de olas*.

Generalmente, la altura H de la ola en el océano es mucho menor que su longitud L . Por tanto, la teoría que describe el movimiento de una ola se simplifica, pudiéndose expresar la velocidad de propagación de la onda c , de la siguiente forma:

$$c^2=g/k \cdot \tanh(kh) \text{ ec. 2.1}$$

Dónde:

$k = 2\pi/L$, es el denominado número de onda; h la profundidad del agua; L la longitud de onda; g la aceleración de la gravedad y \tanh la tangente hiperbólica.

Si se trata de una zona de agua profunda, es decir, la razón entre la profundidad h y la longitud de onda L es mayor que 0,5; el término kh es muy grande. Por tanto, la $\tanh(kh)$ es aproximadamente la unidad, y la expresión de la velocidad de propagación c se reduce a:

$$c = vg/k \quad \text{ec. 2.2}$$

$$c = gT/2\pi \quad \text{ec. 2.3.}$$

De la última ecuación se desprende que viajan más rápido aquellas olas que tienen mayor período.

Por esto, las olas de agua profunda se llaman dispersivas. Esto quiere decir que, cuando se genera una tormenta, siempre van al frente aquellas olas con los períodos T mayores. Son las primeras en alcanzar las costas, aunque no necesariamente las de mayor energía.

Si se trata de una zona de aguas con poca profundidad (también denominadas aguas someras), es decir, cuando la razón entre la profundidad h y la longitud de onda L es menor que 0,05, el término kh es muy pequeño, entonces la velocidad de propagación puede expresarse por:

$$c = \sqrt{gh} \quad \text{ec. 2.4}$$

Puede observarse en esta ecuación que la velocidad de las olas es función de la profundidad h por la cual viajan. A mayor profundidad mayor velocidad. Esto tiene una gran importancia en las transformaciones que las olas sufren conforme se aproximan a la costa, denominada refracción de olas.

En las zonas intermedias, es decir, cuando el agua no es ni profunda ni somera, la ecuación que describe la velocidad de fase de la onda no se puede simplificar (tabla 2.1):

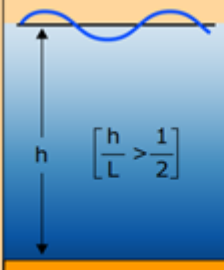
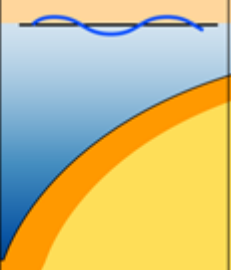

Función	Agua profunda	Intermedia	Agua somera
Velocidad de fase, C	$\frac{g}{2\pi} T$	$\left[\frac{g}{k} \tanh(kh)\right]^{1/2}$	$[gh]^{1/2}$
Límites de aplicación	 h $\left[\frac{h}{L} > \frac{1}{2}\right]$		

Tabla 2.1: Ecuaciones que describen la velocidad de fase de una ola. [Fuente: <https://www.kn3.net/helio3litio/31-2-5-1-3-C-2-8ED-JPG.html>]

Este cambio de dirección se puede analizar trazando líneas perpendiculares al frente de ola como se muestra en la figura 2.5.

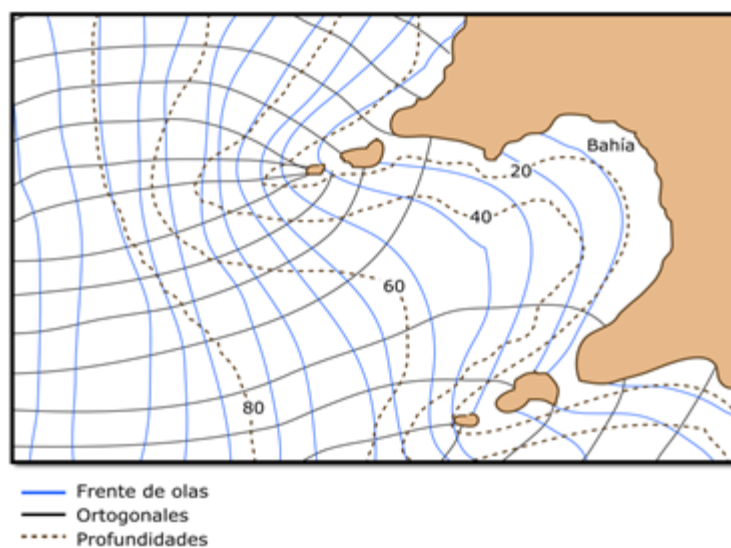


Figura 2.5: Divergencia y convergencia de las olas en la costa [Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-8-Divergencia-y-convergencia-en-la-costa-Fuente-Calero-et-al-2004_fig8_289985113]

Cuando las líneas trazadas se juntan están indicando la convergencia de energía de la ola (aumento de altura H). Es como si el frente de las olas se comprimiera, lo cual implicaría aumentar su altura. Mientras que una separación de las líneas trazadas perpendicularmente al frente de olas indica divergencia de energía (menor altura H), y sería equivalente a que el frente de ola se alargase.

Según las olas se van aproximando a la playa, su velocidad de avance y su longitud de onda disminuyen, y su altura aumenta hasta que la velocidad de las partículas del fluido excede la velocidad de avance de la ola (velocidad de fase), y la ola se hace inestable y rompe (figura 2.6). Esta situación se produce cuando la relación entre la altura de onda H y la profundidad del agua es aproximadamente igual a 0,78.

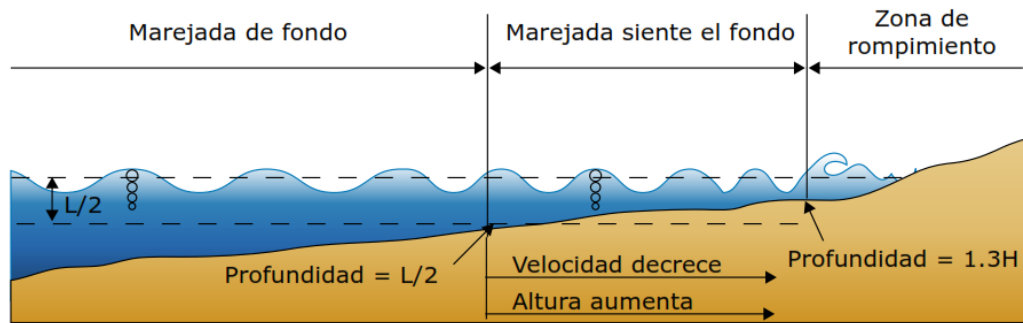


Figura 2.6: Esquema conceptual del rompimiento de las olas en la costa.
 [Fuente: <http://energyprofessionalsymposium.com/img/1235/image860.jpg>]

Otro fenómeno que puede producirse cuando las olas llegan a la costa es el de *reflexión*. Este se produce cuando la ola choca contra un obstáculo o barrera vertical; la ola se refleja con muy poca pérdida de energía. Si el tren de ondas es regular, la suma de las ondas incidente y reflejada origina una ola estacionaria, en la que se anulan mutuamente los movimientos horizontales de las partículas debidas a las ondas incidentes y reflejadas, permaneciendo sólo el movimiento vertical de altura doble y, por lo tanto, de energía doble la incidente. La resultante será la superposición de las dos olas, incidente y reflejada (figura 2.7).

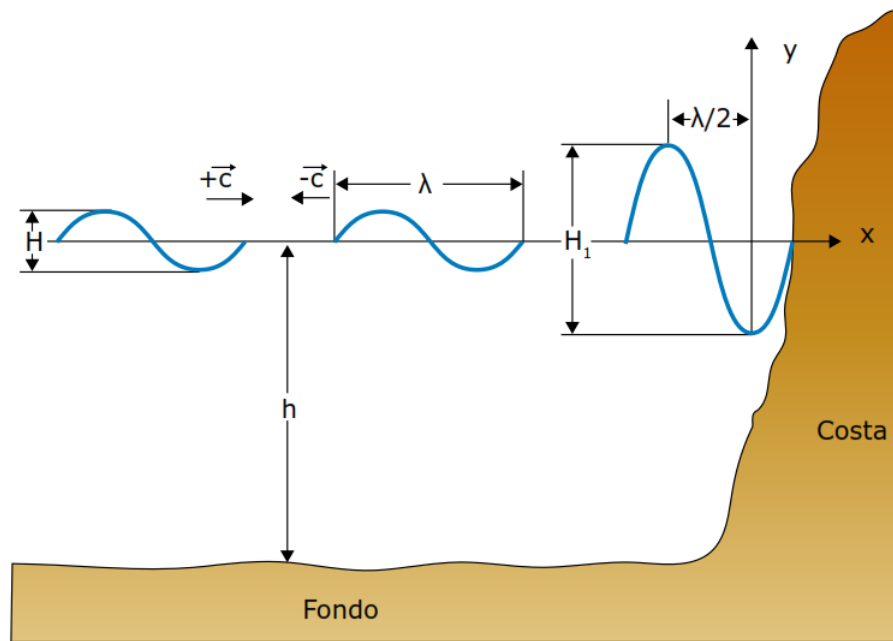


Figura 2.7: Fenómeno de reflexión [Fuente: <http://kimerius.com/app/download/5785622426/Energía+del+oleaje.pdf>]

En condiciones ideales la energía de la onda estacionaria resultante es dos veces la de la onda incidente, fenómeno que puede ser utilizado en la conversión del oleaje. Si el oleaje fuese irregular, la reflexión sería totalmente distinta.

También, en el caso de una barrera puede producirse el fenómeno denominado de *difracción*. Este consiste en la dispersión de la energía del oleaje a sotavento de una barrera, el cual permite la aparición de pequeños sistemas de olas enaguas protegidas por un obstáculo (figura 2.8)

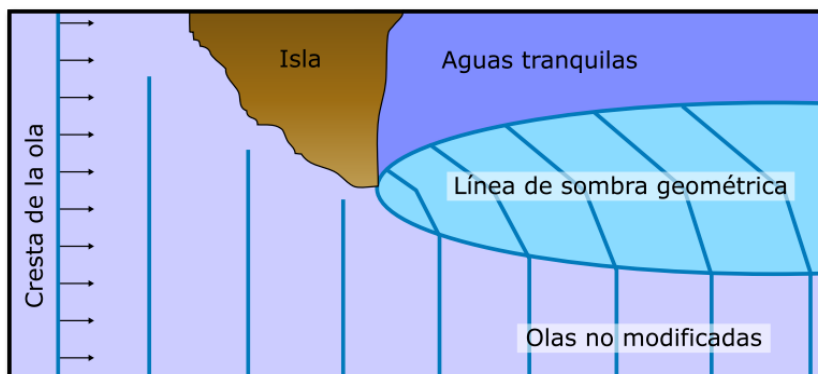


Figura 2.8: Fenómeno de difracción [Fuente: <http://kimerius.com/app/download/5785622426/Energía+del+oleaje.pdf>]

Cuando la ola traspasa la barrera, el frente de olas adopta una forma curva, entrando en una zona de calma por detrás de la barrera, disminuyendo su altura H en esa zona, mientras que la velocidad y la longitud L de la ola no se modifican.

La altura de la ola en la zona de difracción es función del ángulo del oleaje incidente con respecto a la barrera, de la longitud de la barrera, de la profundidad del agua y de la posición del punto en cuestión en la zona de difracción. El fenómeno de la difracción se puede aprovechar para el control y concentración del oleaje.

En definitiva, las olas oceánicas son, esencialmente, como ya se ha mencionado, movimientos de energía. Esta energía es de dos tipos:

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

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

En la figura 2.9 se representa la energía de la ola, que es proporcional a su altura al cuadrado, en función de la frecuencia (o período: que es el inverso de la frecuencia). Asimismo, se indica en una fila la causa generadora principal de este disturbio y en la segunda la fuerza principal que disipa o modifica el movimiento ondulatorio.

El pico de máxima energía está entre los 4 y 12seg, que corresponden a las olas generadas por el viento. Esto quiere decir que la mayoría de las olas en el océano tienen energía alrededor de esos períodos, son las olas más frecuentes formadas en el océano. Obsérvese los picos de ondas de marea de 12 y 24 horas generadas por la Luna y el Sol.

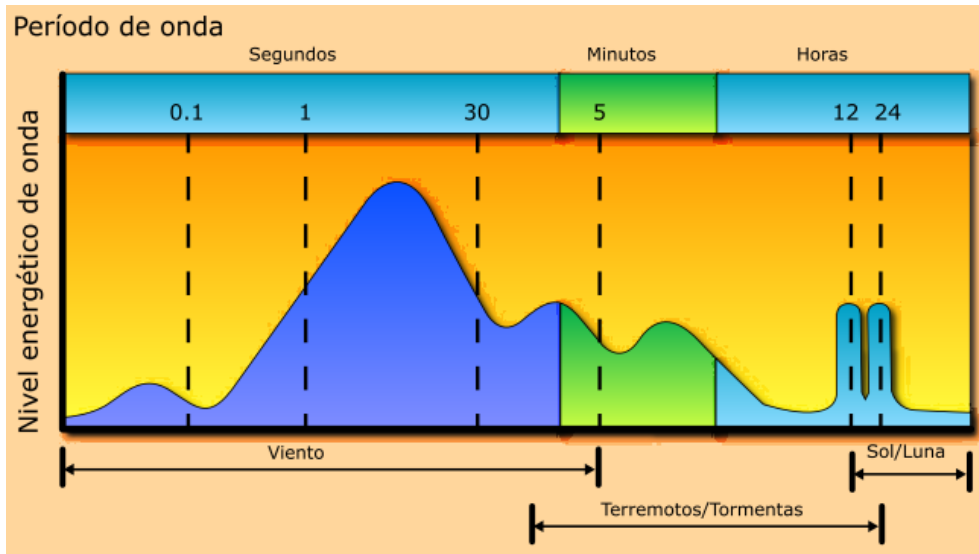


Figura 2.9: Nivel energético del oleaje. [Fuente: <http://kimerius.com/app/download/5785622426/Energía+del+oleaje.pdf>]

2.3. POTENCIAL.

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

Se han realizado diversos estudios con el propósito de estimar el potencial mundial. Se estima la energía mundial explotable es de 2TWh año y que las aguas europeas son capaces de cubrir más del 50% del consumo total de potencia en el continente.

La energía que una ola adquiere depende, básicamente, de: la intensidad del viento que sopla sobre la superficie del océano, del tiempo en que el viento está soplando y del alcance o superficie sobre la cual sopla el mismo. [4]

La potencia P , en kW por metro de ancho de ola, contenida en una ola oceánica idealizada (onda senoidal de amplitud constante y periodo y longitud de onda bien definidos) puede expresarse según la siguiente ecuación 2.5:

$$P = \frac{g^2 \rho H^2 T}{32\pi} \text{ (kW/m) } \text{ ec.2.5}$$

Según esta ecuación la potencia contenida en una ola es proporcional al cuadrado de la amplitud H y al periodo del movimiento T . Las olas con periodos largos (entre 7s

y 10s) y grandes amplitudes (del orden de 2m) tienen un flujo de energía que normalmente excede de los 40-50kW por metro de ancho.

La potencia total en cada metro de frente de ola del mar irregular es la suma de las potencias de todos sus componentes. Evidentemente, es imposible medir todas las alturas y periodos de ondas independientemente, por tanto, para estimar la potencia total se utiliza una media.

Utilizando dispositivos de medida de las características de las olas (figura2.10) o satélites (figura2.11) es posible recoger la variación del nivel de la superficie del mar durante un determinado periodo.



Figura 2.10: Dispositivo de medida de las características del oleaje. [Fuente: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%C3%ADa%20del%20oleaje%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%C3%ADa%20del%20oleaje%20(2).pdf)]



Figura 2.11: Satélite para medir características del oleaje- [Fuente: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%20del%20oleaje%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%20del%20oleaje%20(2).pdf)]

Con los datos recopilados es posible calcular lo que los oceanógrafos denominan la altura significativa de las olas H_s (figura 2.12), la cual se define como la altura promedio de la tercera parte de las olas más altas en un registro, y el periodo energético o periodo de nivel cero T_e , como el periodo de tiempo que transcurre entre valores sucesivos el paso de una ola dos veces consecutivas por una línea imaginaria situada a la mitad de distancia entre una cresta y un valle.

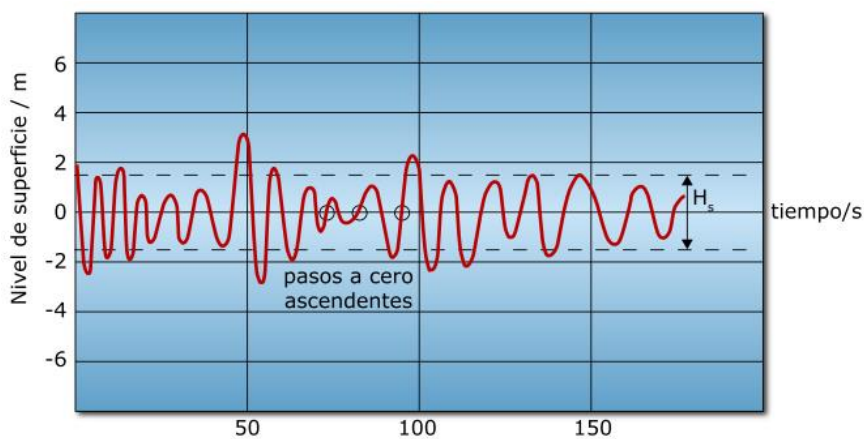


Figura 2.12: Altura significativa de las olas. [Fuente: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%20del%20oleaje%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%20del%20oleaje%20(2).pdf)]

Por tanto, en un mar irregular típico, la potencia media total, en kW/m, vendrá dada por la ecuación 2.6:

$$P_s = 0.49H_s^2 T_e$$

ec. 2.6

Como la mayoría de las fuentes renovables de energía, la energía de las olas se encuentra distribuida en el globo terráqueo de forma desigual. Las zonas del mundo sujetas a vientos regulares son las que disponen de mayores potenciales energéticos que pueden extraerse de las olas. Así, la actividad de las olas se ve incrementada entre las latitudes de 30° y 60° en ambos hemisferios, inducidas por los vientos alisios predominantes que soplan en estas regiones. Los vientos procedentes del Golfo de Méjico, que soplan con una dirección predominante del noreste, cruzan el Atlántico y tienen varios miles de kilómetros para transferir energía al Océano Atlántico. Estos vientos crean grandes olas que llegan a las líneas de costa de Europa.

En la figura 2.13 se muestra una distribución global de la energía de las olas en kW por metro de ancho de ola, en varios lugares del mundo.

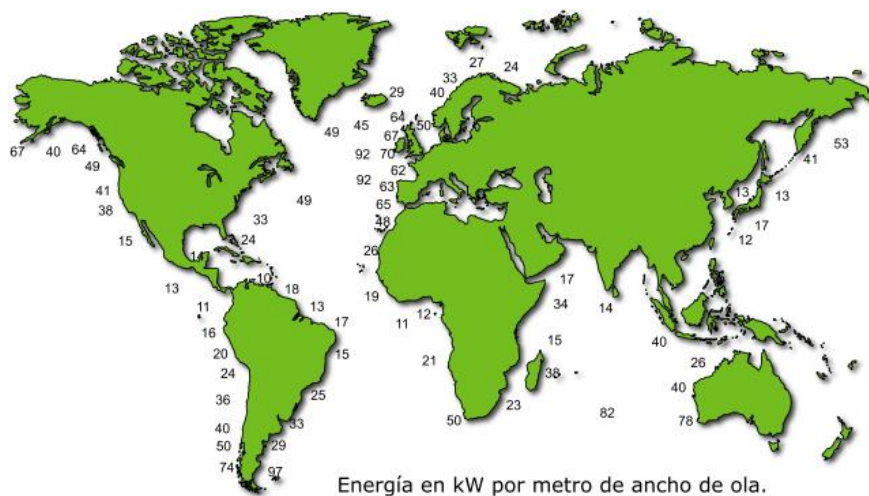


Figura 2.13: Distribución global de la energía de las olas en kW/m² de ancho de ola. [Fuente: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%C3%ADa%20del%20oleaje%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%C3%ADa%20del%20oleaje%20(2).pdf)]

Para capturar la máxima energía de una ola los aparatos deberían diseñarse para interceptar completamente los movimientos de las partículas de agua, es decir, deberían capturar la energía de todos los movimientos circulares de la ola, desde la superficie hasta las profundidades (figura 2.4). Sin embargo, ya que las orbitas más profundas y pequeñas contienen poca energía no resulta viable, desde el punto de vista técnico y económico, tratar de capturarlas todas.

A la hora de decidir cuánto debe introducirse, debajo de la superficie del mar, un dispositivo de captación de energía del oleaje, ha de tenerse presente que el 95% de la energía de una ola se encuentra entre la franja comprendida entre la superficie y una profundidad de un cuarto de la longitud de onda L (figura 2.14).

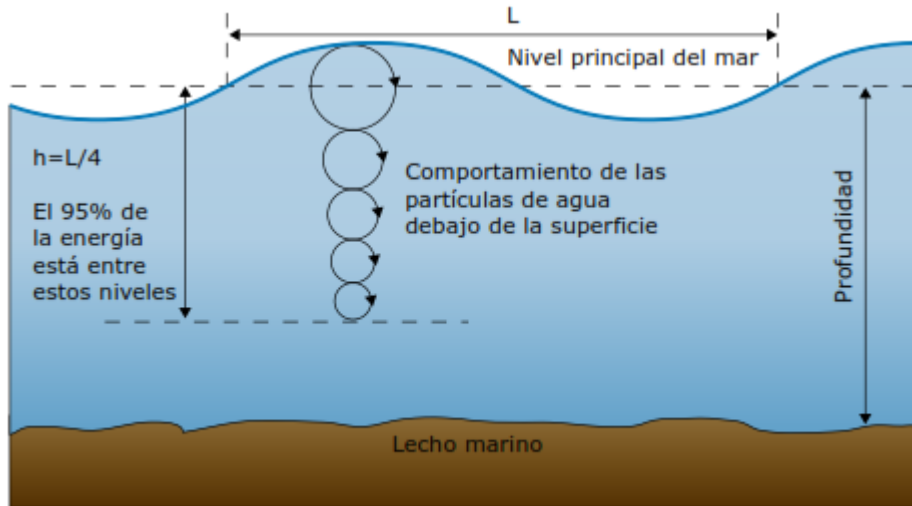


Figura 2.14: Franja donde se encuentra la energía de una ola [Fuente: <https://www.kn3.net/helio3litio/33-4-F-5-E-A-F-BF8-JPG.html>]

Existen pocos lugares en el mundo donde la línea de costa está constituida de acantilados bañados por aguas profundas. Estos lugares son los más apropiados para instalar dispositivos de captación de la energía del oleaje ya que las olas incidentes contienen gran cantidad de energía. Sin embargo, en la mayoría de las zonas costeras del mundo las aguas son poco profundas.

La ola cuando se acercan a aguas poco profundas va perdiendo gradualmente su potencia. Ello se debe a la fricción que se produce entre las partículas de agua más profundas y el fondo del mar, siendo el efecto más significativo cuando la profundidad del agua es menos de un cuarto de la longitud de ola. Esta pérdida de potencia es muy importante ya que reduce la cantidad de energía útil que puede extraerse del oleaje. Normalmente, olas con una densidad de potencia de 50kW/m , en aguas profundas, pueden reducir su densidad a 20kW/m o menos cuando están más cerca de la costa, en aguas poco profundas, dependiendo de la distancia recorrida en aguas poco profundas y de la rugosidad del fondo del mar. Por otro lado, las olas

originadas por tormentas también se atenúan y por consiguiente son menos probables que destruyan los aparatos instalados en la línea de costa.

Hay otro mecanismo que interviene en la pérdida de potencia de las olas cuando estas llegan a la playa. Las olas se rompen, son turbulentas y disipan energía. Estas olas son apropiadas para actividades deportivas y de ocio, pero no válidas para las estructuras de los aparatos que se instalen para captar su energía. Hay que tener en cuenta que los aparatos de captación deben ser diseñados no solo para que funcionen correctamente en las tareas de conversión energética a un costo apropiado, sino que también deben ser capaces de soportar las cargas más extremas que produzcan las olas, lo cual puede elevar de forma notable los costos de inversión de la instalación.

2.4. TECNOLOGÍAS: TÉCNICAS DE CONVERSIÓN Y TRANSMISIÓN.

Ante la potencia de las olas que todos los días golpean las costas de islas y continentes, se han imaginado los dispositivos más ingeniosos y, a veces, más increíbles, para captar esta tentadora fuente de energía. Sin embargo, muchos de ellos no han pasado de la etapa de diseño y sólo una pequeña proporción ha sido ensayada y evaluada. Además, solo unos pocos han sido ensayados en el mar, y muy pocos han sido los que han alcanzado la fase comercial.

Los dispositivos para aprovechar la energía almacenada en las olas deben captar la energía cinética y/o potencial de la misma y convertirla eficientemente en otra de energía útil, generalmente energía eléctrica.

Sin embargo, el desarrollo de estos aparatos se ve condicionado por una serie de dificultades, entre las que se pueden señalar:

- La irregularidad en la amplitud, fase y dirección de las olas; ello dificulta la obtención de la máxima eficiencia del aparato en todo el rango de frecuencias de excitación.
- La carga estructural en el caso de condiciones climáticas extremas, tales como huracanes, pueden superar a la carga media en más de 100 veces.

- Es necesario acoplar el lento (frecuencia de aproximadamente 0,1 Hz) e irregular movimiento de una ola con la mayor frecuencia de excitación (aproximadamente 500 veces mayor) que normalmente precisan los generadores eléctricos).

Se les llama dispositivos o convertidores OWC (*Oscilating Water Column*) a todo dispositivo o mecanismo que es capaz de transformar la energía del oleaje en energía útil. De esta forma, hablaremos plenamente de alguno de los diferentes OWC y sus antecedentes.

Los OWCs tienen que ser capaces de funcionar eficientemente para las múltiples gamas de frecuencia y amplitud de las olas a pesar de los embates del mar.

Existen testimonios que datan de la primera utilización de las olas por el s. XII, como dice Fernández Díez [5], donde China ya empezaba a operar una serie de molinos accionados por el oleaje. Pero no fue hasta los inicios del s. XX cuando se empezarían a desarrollar en Occidente los dispositivos de energía undomotriz. Existe documentación, en la cual no profundizo ya que no es naturaleza de este trabajo, que explica una serie de pruebas de mecanismos similares a los actuales sistemas de columna oscilante ocurridas sobre los años 20 en California, EEUU. A la par, en el Imperio de Japón ya estaba desarrollado el motor de péndulo. Para 1921 el Instituto Oceanográfico de Mónaco, utiliza una bomba accionada por las olas para elevar agua a 60m con una potencia de 400 W.

En 1940, Francia plantea una serie de plantas de energía undimotriz en su colonia argelina, las cuales no llegaron a fabricarse a causa de los sucesos de la Guerra Mundial.

A finales de los años 50, se diseña en la Isla de Mauricio (R.U) una central para la obtención de 20 MW que consistía en una rampa fija sobre el arrecife, por medio de la cual subía el agua a un embalse situado a 3m por encima del nivel del mar, impactando contra los OWC correspondientes. Esta central nunca llegó a construirse.

En el año 1975, se construiría en Puerto Rico, EEUU, un diseño similar al desarrollado por los británicos en las Islas Mauricio. Uno de los diseñadores y técnicos más influyentes en la energía undimotriz a lo largo del siglo; fue el Capitán del navío de la Armada Imperial japonesa Yoshio Musada, que empezó sus investigaciones en 1945, ensayando en 1947, el primer prototipo de Raft, a partir de 1960 desarrolla un sistema neumático para la carga de baterías en boyas de navegación, con una turbina de aire de 60W, de la que se vendieron más de 1200 unidades a empresas japonesas y al resto del mundo. [6]

En 1970, se construye en Japón con ayuda de Musada una plataforma flotante, de 80m de largo y 12m de ancho, llamada Kaimei, que alberga 11 cámaras para la obtención de energía undimotriz.

La investigación a gran escala de mecanismos OWC se desarrolla a partir de 1974, siendo en R.U., Francia y Japón los máximos propulsores de estas. Se estudian sofisticados sistemas para grandes aprovechamientos, actividad que R.U. abandona casi totalmente en 1982, por falta de recursos económicos. Finalmente, desde los años 80 se han venido desarrollando las plantas de undimotriz a lo largo del planeta, siendo en la CEE (posteriormente UE) la que más ha invertido desde la fecha.

2.5. CONVERSORES DE ENERGÍA DEL OLEAJE, OWC.

Los OWCs son dispositivos mecánicos que convierten y/o transforman la energía generada por una ola u onda en energía eléctrica, por medio de sistemas que incluyen un pase primario-mecánico y una secundaria-eléctrica con el uso de transformadores. Pocas son las instalaciones que se han ensayado en el mar a la escala natural, por lo que falta experiencia operativa con prototipos reales. En general, a medida que aumenta la distancia a la costa la densidad de energía es mayor y existe una mayor complicación para el transporte de la energía generada, por lo que hay que encontrar un compromiso entre la energía generada por el OWC y la densidad de energía.

Son muchas las modalidades de OWCs que permiten obtener energía del oleaje, aunque no está todavía claro cuáles son las opciones más favorables, debido a la heterogeneidad de la fuente de energía acorde al plantea, existen múltiples mecanismos preferentes en estas zonas. A pesar de esto, los OWCs cumplen con una serie de características más comunes.

2.5.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS OWCs.

Dependiendo de sus características básicas, los OWCs pueden estar englobados en:

- a) Por la capacidad de producción energética de la que dispone, relacionada con el punto anterior; pueden ser grandes, medianos o pequeños aprovechamientos.
- b) Por su posición con respecto a la costa: OWCs en altamar, cerca del litoral o en la costa.
- c) Por su posición con relación a la dirección del oleaje, destacando:
 - a. Totalizadores o terminadores: OWCs largos con eje paralelo al frente del oleaje.
 - b. Atenuadores: OWCs largos con eje perpendicular al frente del oleaje.
 - c. Absorbedores: puntuales o momentáneos: OWCs aislados de dimensiones reducidas, los cuales aprovechan el efecto antena o pico (concentración y convergencia del oleaje).
- d) Por su posición relativa al agua: Pudiendo ser OWCs fijos o flotantes, semisumergidos o sumergidos.
- e) Por otros criterios, véase la capacidad de almacenamiento, el impacto medioambiental, eficiencia, materiales de fabricación, etc.

En la actualidad la investigación de los OWCs está centrada principalmente en los sistemas: Raft, Rompeolas sumergidos, boyas mecánicas, sistemas péndulo, etc.

Dejando un amplio margen de maniobra para disponer en el futuro de nuevos sistemas con una mayor eficiencia.

Los OWCs utilizan un método basado principalmente en dos etapas, la primera o primaria y la secundaria o final, pudiendo ser también diferenciados por los distintos mecanismos utilizados para cada etapa, a continuación explico las características principales de cada etapa, puesto que prácticamente todos los OWCs las utilizan.

2.5.2. CONVERSIÓN PRIMARIA.

Esta primera etapa consiste simplemente en la extracción de la energía de la ola por medio de sistemas mecánicos o neumáticos, consiguiendo transformar el movimiento de las olas en un movimiento de una columna de aire (flujo controlado), traduciéndose en gradientes de presión o en el desplazamiento mecánico de cuerpos acumuladores de energía, pudiendo ser flotadores en sentido vertical o en rotación. Esto, con el fin de pasar a la segunda etapa o fase.

2.5.3. CONVERSIÓN SECUNDARIA.

Esta segunda etapa es la transformación en energía utilizable (normalmente eléctrica) partiendo normalmente de los acumuladores de energía, siendo los flotadores, zonas de resonancia, etc. Los medios utilizados para esta segunda conversión suelen ser turbinas neumáticas o hidráulicas, dispositivos de transmisión mecánica, etc.

2.6. MÉTODOS DE CAPTACIÓN.

Las técnicas de utilización energética del oleaje aprovechan la energía que se producen por las olas pueden ser clasificados en:

- Totalizadores.
- Sistemas por bombeo.

- Sistemas hidráulicos.

2.6.1. TOTALIZADORES O TERMINADORES.

Están situados perpendicularmente a la dirección del avance de la ola (paralelos al frente de la onda), y pretenden captar la energía de una sola vez; son los más estudiados.

Podemos considerar los siguientes:

2.6.1.1. OWC Columna Oscilante.

Las OWC consisten en una estructura hueca, parcialmente sumergida, que está abierta al mar por su parte inferior (figura 2.15). Esta estructura encierra una columna de aire en la parte superior de una columna de agua.

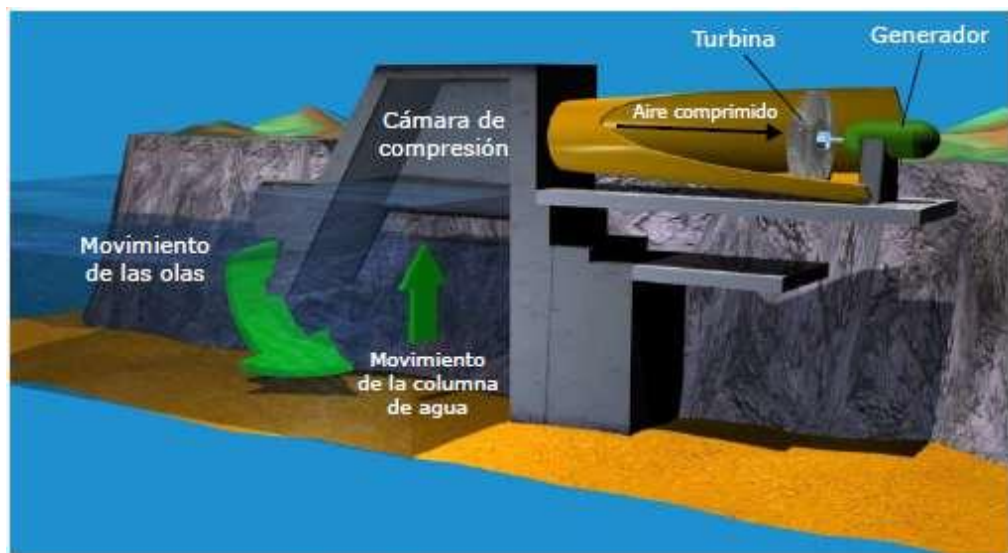


Figura 2.15: Instalación de columna oscilante de agua (OWC) [Fuente <http://eduambiental.org>]

Cuando las olas actúan sobre el aparato hacen que la columna de agua suba y baje, con lo cual la columna de aire se comprime y descomprime alternativamente. Es decir, se aprovecha el principio de la cavidad resonante. Si este aire atrapado se le permite fluir hacia y desde la atmósfera a través de los alabes de una turbina, puede extraerse energía mecánica del sistema y usarse para generar electricidad mediante un generador eléctrico mecánicamente acoplado a la turbina.



Figura 2.16: Instalación real Islay-Escocia, 2001 (OWC) [Heath,2008]

2.6.1.2. OWC Rectificador Russel.

Es un totalizador pasivo; consiste en una gran estructura tipo depósito construida sobre el lecho marino, que consta de dos cuerpos o tanques. Uno superior y otro inferior, separados del mar por unas compuertas.

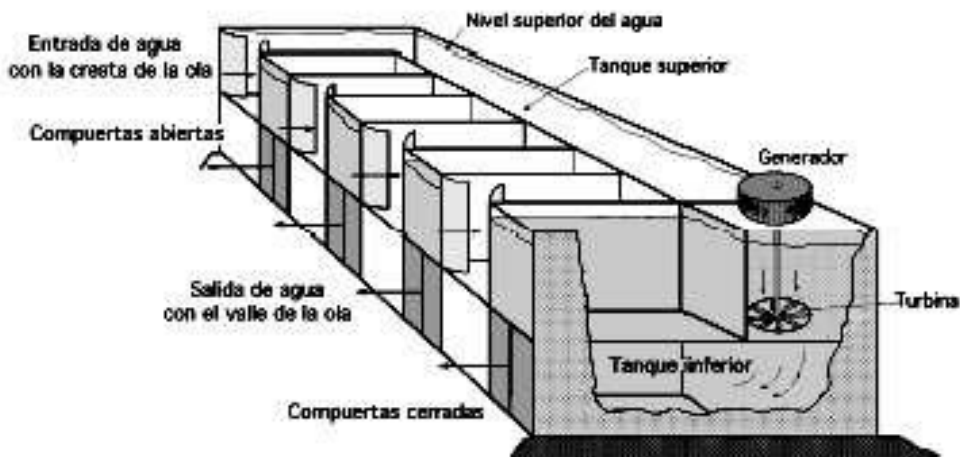


Figura 2.17: Rectificador Russel.[<http://fjarabo.webs.u11.es>]

Las compuertas superiores se abren con la cresta de la ola, penetrando grandes cantidades de agua en el tanque superior, mientras que las compuertas inferiores permiten la salida del agua del tanque inferior con el valle de la ola; ambos tanques

están comunicados por una turbina la cual funciona al hacerse el trasvase de agua del tanque superior al inferior, de acuerdo con el movimiento de las olas. Igual que en la imagen anterior.[7]

2.6.1.3. OWCs Péndulo.

El péndulo es un dispositivo apto para ser instalado en un rompeolas. Consta de una caja rectangular de concreto, que en uno de sus extremos se encuentra abierta al mar.

Una aleta péndulo está articulada sobre esta abertura, de modo que la acción provoca un vaivén, estas oscilaciones se transmiten y absorben por un dispositivo oleohidráulico. Más específicamente, consiste en una cámara fabricada de hormigón de forma que el frente hacia el mar está provisto de una placa rígida de acero, articulada en su parte superior que puede oscilar ligeramente. En el interior de la cámara, de una profundidad del orden de un cuadro de longitud de ola, se produce una ondulación estacionaria que mueve la placa, cuyas oscilaciones se transmiten y absorben por un dispositivo oleohidráulico.

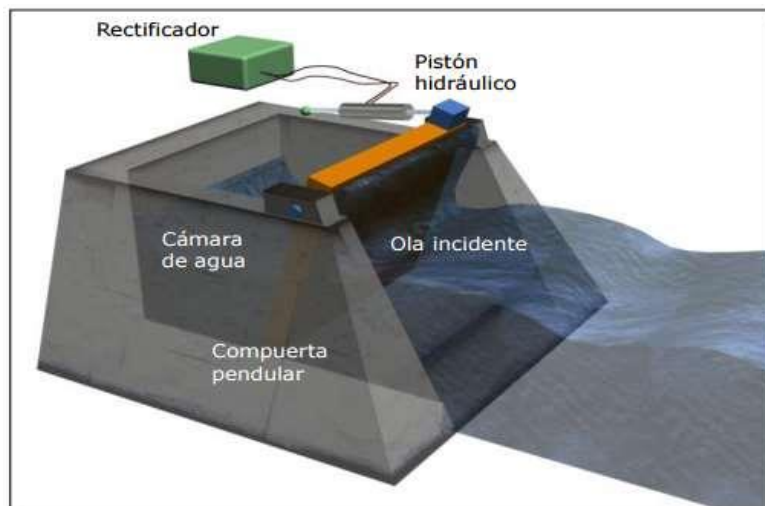


Figura 2.18: Dispositivo Pendular. [Fuente:

[file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%C3%ADa%20del%20oleaje%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%C3%ADa%20del%20oleaje%20(2).pdf)]

2.6.1.4. OWC Unión Fenosa

Es un sistema de conversión primaria y secundaria por medio mecánico, desarrollado e instalado por la empresa Unión Fenosa en la Central Térmica de Sabón (A Coruña), aprovechando la instalación hidráulica del sistema de refrigeración de uno de los condensadores de la central térmica. El OWC ubicado en e l pozo existente, comunica con el mar, y consta de un flotador de 6m de diámetro, conectado mediante una cadena a un dispositivo mecánico que transforma el movimiento ascendente/descendente del flotador en un giro, mediante un rectificador acoplado a un multiplicador de velocidad y aun generador eléctrico, con un volante de inercia. [8]

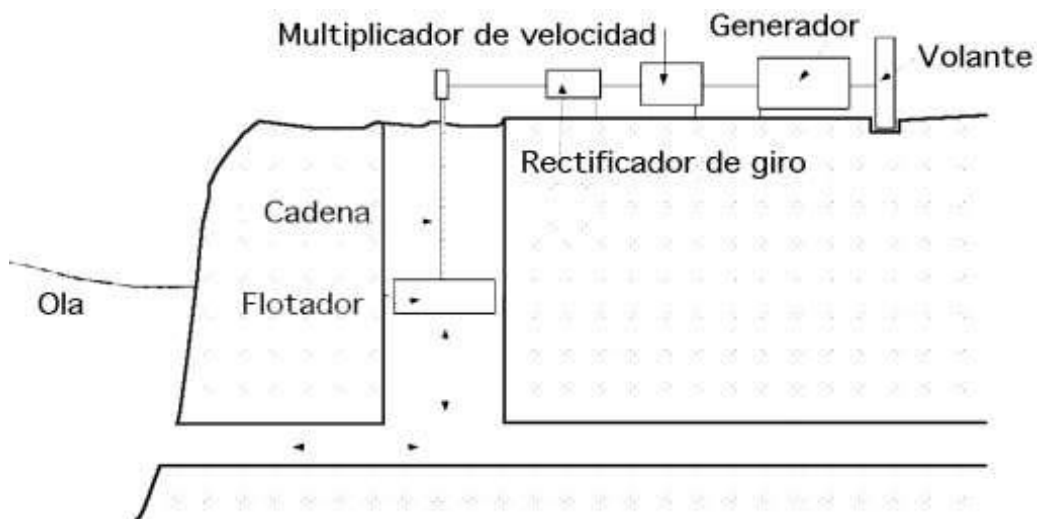


Figura 2.19: Sistema diseñado por Unión Fenosa. [Fernández Díez,2002]

2.6.1.5. OWC Tapchan (Noruega).

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 del 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 de hélice convencional.[9] El prototipo de 400 Kw con un desnivel de 4 m por encima del

nivel medio del mar; está instalada en Toftestallen, Noruega, funcionando satisfactoriamente.

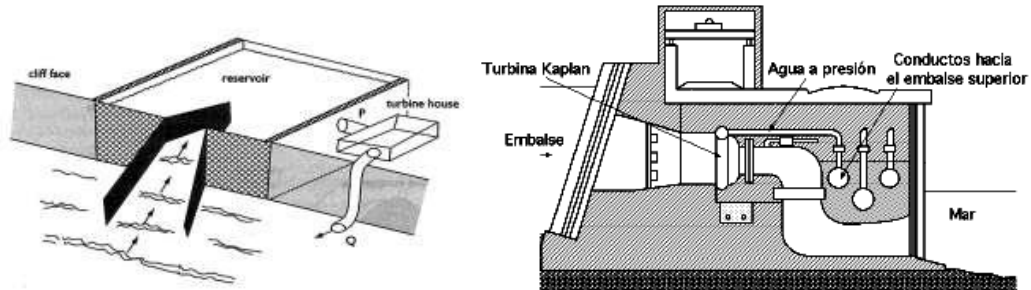


Figura 2.20: OWC Tapchan. [Fuente: www.ingenieroambiental.com/3008/4OLASP3.pdf]

2.6.2. SISTEMAS DE BOMBEO.

2.6.2.1. OWC Mecánico.

Los OWCs mecánicos aprovechan la oscilación del agua en la cámara mediante un flotador, que puede accionar agua (bomba) o aire (compresor). El flotador puede accionar también un motor hidráulico, o un turboalternador.

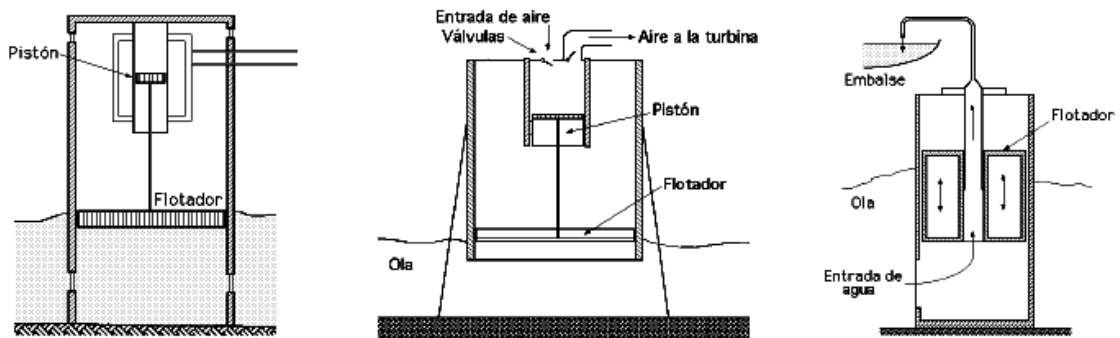


Figura 2.21: OWC mecánico. [http://ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf]

2.6.2.2. OWC Bomba de manguera.

La bomba de manguera, desarrollada en Suecia en los años 80, aprovecha las características elásticas de una manguera de elastómeros. Cuando la manguera, provista de válvulas rectificadoras, se estira, su volumen interior disminuye; si se ata

uno de sus extremos al fondo del mar, y el otro a un cuerpo flotante, se dispone de una bomba accionada por el desplazamiento vertical del flotador.

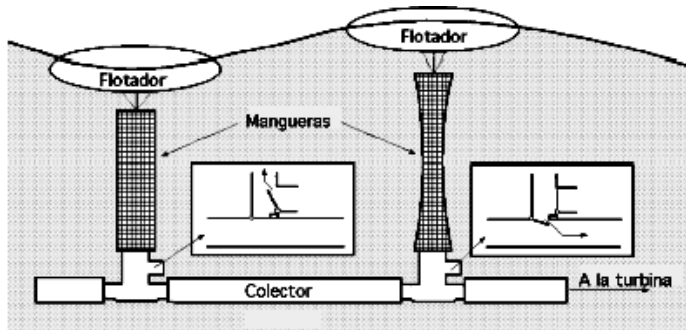


Figura 2.22: OWC Bomba de manguera.[<http://ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>]

El diseño actual consiste en varias unidades conectadas en serie, que suministran agua de mar a una turbina Pelton, a presiones entre 1 MPa y 4 MPa; el dispositivo suministra electricidad a boyas de navegación. Recientemente se ha ensayado un sistema de 110 kW que incorpora un tanque para almacenamiento de agua, con el fin de su posterior utilización en una turbina hidráulica.

2.6.2.3. OWC Bomba de pistón.

Este sistema consta de un cilindro con pistón en una estructura de hormigón ubicada en el fondo del mar, un flotador y un cable que une el pistón y el flotador. El pistón asciende por la acción del oleaje y desciende por gravedad, y está provisto de válvulas rectificadoras a la entrada del agua generando un flujo de agua que se aprovecha en una turbina hidráulica. Se construyó un prototipo a tres km de la costa de Hanstholm, Dinamarca, que fue destruido por el temporal; tenía una base cilíndrica de hormigón armado de 9m de diámetro, y estaba anclado a 30m de profundidad.[10]

El cuerpo flotante, también de hormigón, de 6m de diámetro, estaba conectado con el cilindro, en el fondo, a través de un cable. La electricidad, que se generaba en una turbina sumergida y un generador estándar de 45Kw, es enviada a la costa a través de un cable.

Una central ficticia de bombas de pistón, constituida por 2640 flotadores de 10m de diámetro, 100 Tm de peso, con un pistón de 55 Tm, y una estructura de hormigon en el fondo de 3000Tm, generaría 350Mw

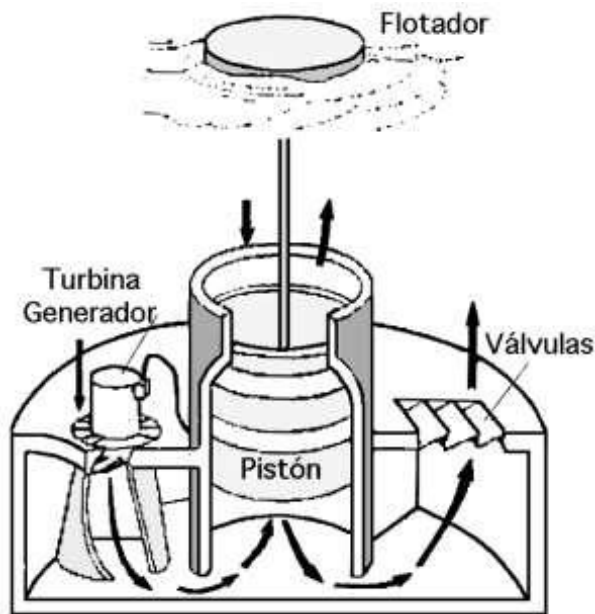


Figura 2. 23: OWC Bomba de pistón .[<http://ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>]

Para la desalación del agua del mar existen prototipos con bombas de pistones, en fase de experimentación. El de Delbuoy, consta de seis bombas de 2,1m de diámetro, que producen 5,7m³ de agua dulce por día, con olas de 1m y período entre 3 y 6 segundos. [11]

En otros sistemas, la bomba de pistón estaba montada sobre la boya; tanto la boya como la plataforma de anclaje; están construidas con neumáticos usados de diámetro 2,5m.

2.6.3. SISTEMAS HIDRÁULICOS.

2.6.3.1. OWC Duck o Pato Salter.

Dentro de los sistemas hidráulicos, cabe destacar el Pato Salter; el cual es muy utilizado por las industrias del sector energético. Por esta razón entiendo que debo hacer más incapié en estos sistemas. Se sitúan perpendicularmente a la dirección de la ola incidente, es decir, paralelo al frente de la ola para captar la energía de una sola vez (Rectificador Russel, Pato Salter, Balsa Cockerell).

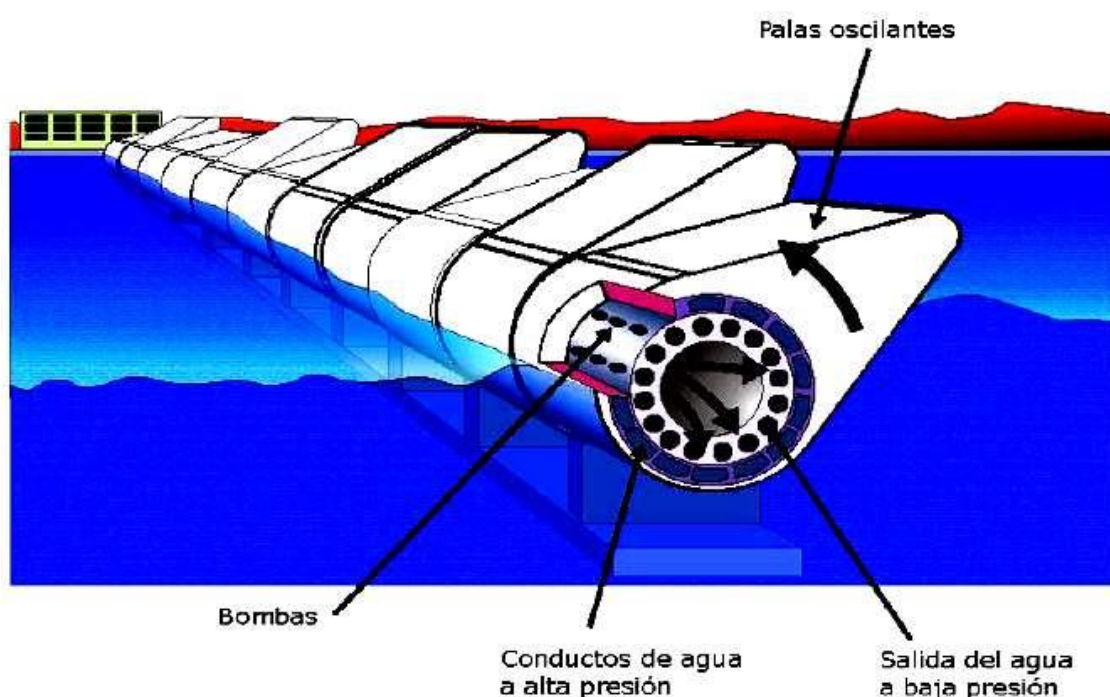


Figura 2.24: OWC Duck o Pato Salter. [Fuente: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%C3%ADa%20del%20oleaje%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%C3%ADa%20del%20oleaje%20(2).pdf)]

Se puede considerar como un totalizador activo para el aprovechamiento de las olas a gran escala en altamar; desarrollado en la década de los 70, en Edimburgo, consiste en un flotador alargado cuya sección más estrecha se enfrenta a la ola con el fin de absorber su movimiento lo mejor posible, mientras que su parte posterior es cilíndrica, para evitar pérdidas de energía por rozamiento. Los flotadores giran bajo la acción de las olas, lentamente, alrededor de un eje cuyo movimiento de rotación acciona una bomba de aceite que se encarga de mover una turbina.[12]

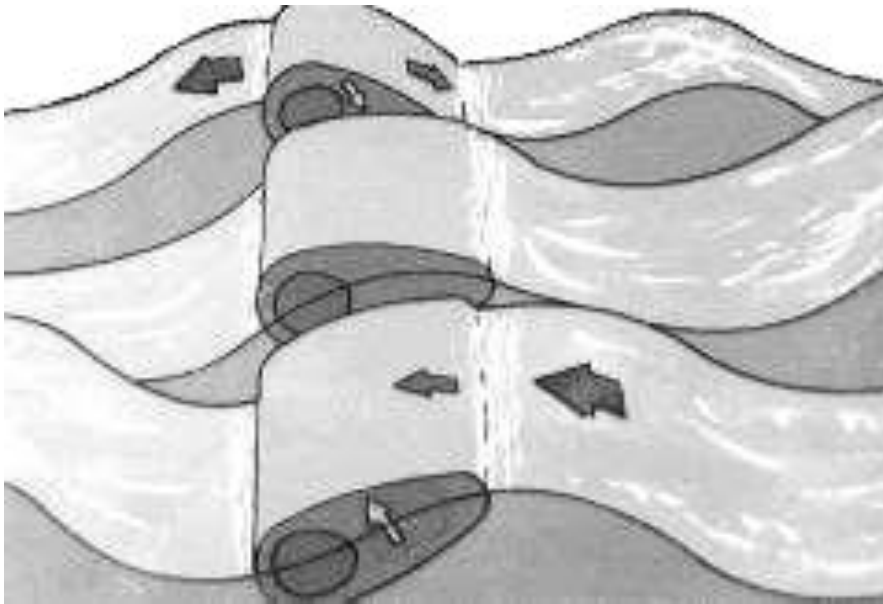


Figura 2.25: Movimiento de los flotadores bajo la acción de las olas. [Fuente: <http://www.ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>]

El sistema consiste en péndulos invertidos, articulados en su parte inferior y montados sobre un eje que permite movimientos en dirección del oleaje, en la que una parte actúa como flotador de balanceo manteniendo una cierta rigidez, es decir, no se ve influenciada por las olas permaneciendo fija, mientras que la parte activa consiste en unos flotadores en forma de leva que se mueven accionados por el ritmo de las olas, creándose en los mismos un movimiento oscilatorio, que acciona unos sistemas oleohidráulicos (movimiento alternativo) conectados a una turbina, originando el giro del eje de la misma y, por lo tanto, la generación de energía.

2.6.3.2. OWC Raft o Balsa Cockerell.

Los Rafts son gigantescas plataformas flotantes, articuladas entre sí, (dos o más). Unidas mediante mecanismos hidráulicos (cilíndro-émbolo), que reciben el impacto de las crestas de las olas, de forma que los movimientos de giro parcial de los flotadores accionados por ellas, se aprovechan para mover fluido mediante el sistema (cilíndro-émbolo), colocado en las articulaciones que unos los flotadores (movimiento alternativo), [13] accionando el fluido a presión una turbina.

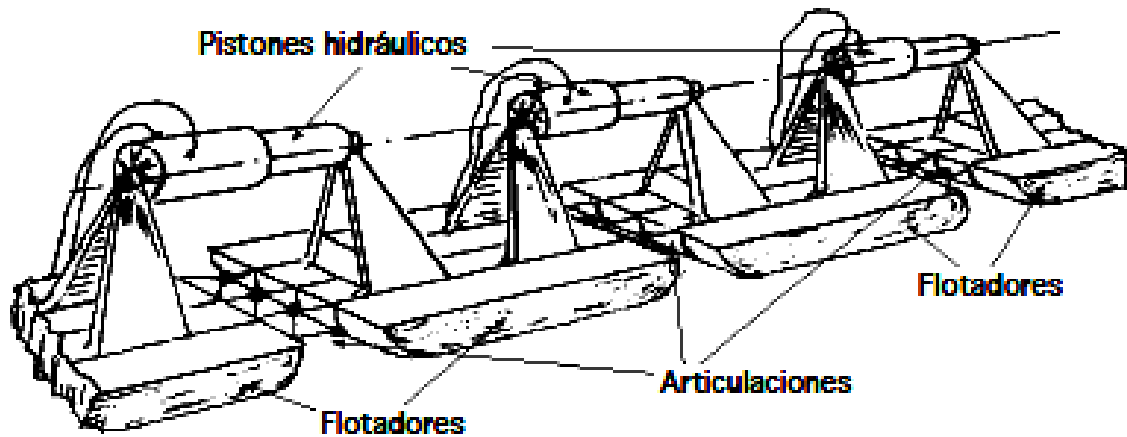


Figura 2.26: OWC Rafts. [Fuente: <http://www.ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>]

2.6.3.3. OWC Pelamis.

Es una estructura semisumergida articulada, compuesta por módulos cilíndricos unidos de tal forma que el movimiento inducido por la ola en estas uniones se transmite a unos émbolos hidráulicos que bombean aceite a alta presión a unos sistemas electrohidráulicos que generan electricidad. Se pueden conectar juntos varios dispositivos estando unidos a la orilla y al fondo del mar mediante cables. La máquina se mantiene en posición mediante un sistema de amarre que combina flotadores y lastre, de forma que la cabeza haga frente a las olas.

El prototipo genera 750 Kw, tiene 120 m de longitud y 3,5 m de diámetro; consta de tres módulos de conversión de energía, cada uno de 250 Kw. Cada módulo contiene un sistema electrohidráulico completo generador de energía.

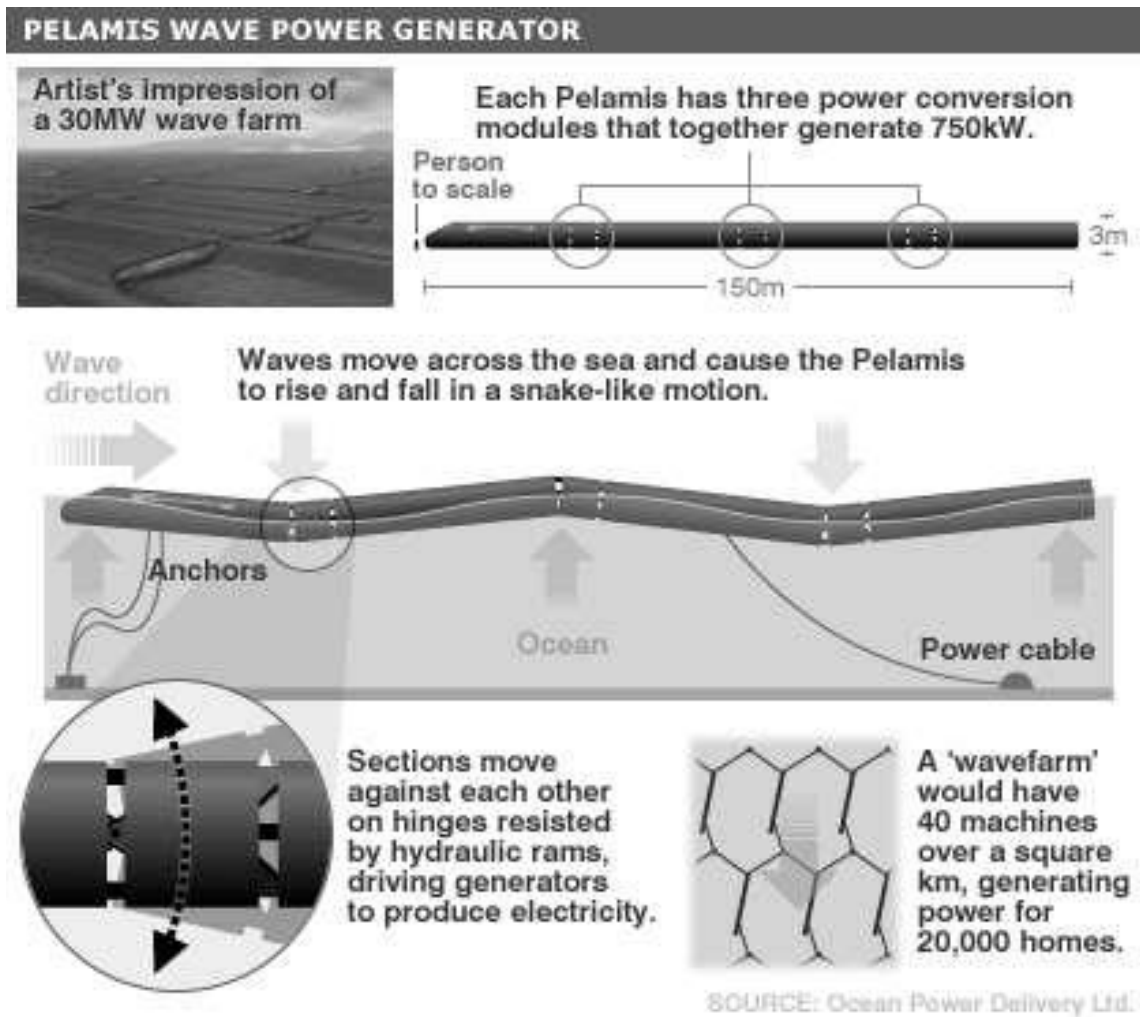


Figura 2.27: OWC Pelamis.[fuente: Ocean Power Delivery lit]

Se trata sin duda de la iniciativa más seria llevada a cabo para obtener energía eléctrica de esta importante fuente de energía renovable que son las olas.

La primera central de aprovechamiento de la energía de las olas en el mundo se está llevando a cabo en Aguçadoura (Norte de Portugal) a 8km de la costa. La nueva central tendrá una potencia de 2.25 MW y será capaz de suministrar electricidad a unas 1500 familias.

La central ha sido impulsada por la empresa portuguesa Enersis y proyectada y diseñada por la empresa escocesa Ocean Power Delivery, líder mundial en esta tecnología.

La central está formada por una serie de grandes tubos de acero de 3,5cm de diámetro de 150m de largo denominados "Pelamis". Estos componentes quedan

sumergidos en el mar y son los encargados de transformar el movimiento de las olas en energía eléctrica.

Los pelamis están formados por 4 cuerpos articulados por 3 bisagras en las cuales están alojadas unas bombas hidráulicas. Cuando una ola pasa por el pelamis el vaivén al que queda sometido provoca que las bisagras se doblen y que las bombas hidráulicas entren en acción enviando un fluido a alta presión hasta el generador hidráulico que produce energía eléctrica. Cada pelamis es capaz de generar una energía de 750 kw que se hace llegar a tierra a través de unos cables submarinos.

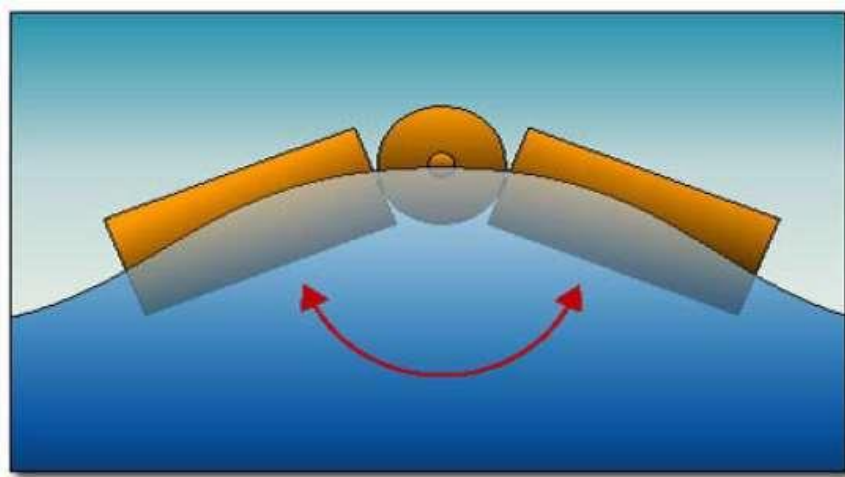


Figura 2.28: Diseño de Sistemas Pelamis. [<http://ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>]

2.6.3.4. OWC Rompeolas Sumergido.

Se han propuesto rompeolas sumergidos, véase figura 2.29, para calmar el mar, (que evitan impactos por el oleaje y no dificultan el tráfico marino), a base de placas horizontales ancladas en el fondo, que han demostrado su efectividad para absorber parcialmente el oleaje; en ensayos de laboratorio se ha encontrado que hasta el 35% de la energía incidente del oleaje circula por debajo de la placa, en sentido opuesto al oleaje, flujo que se podría aprovechar en una turbina hidráulica.

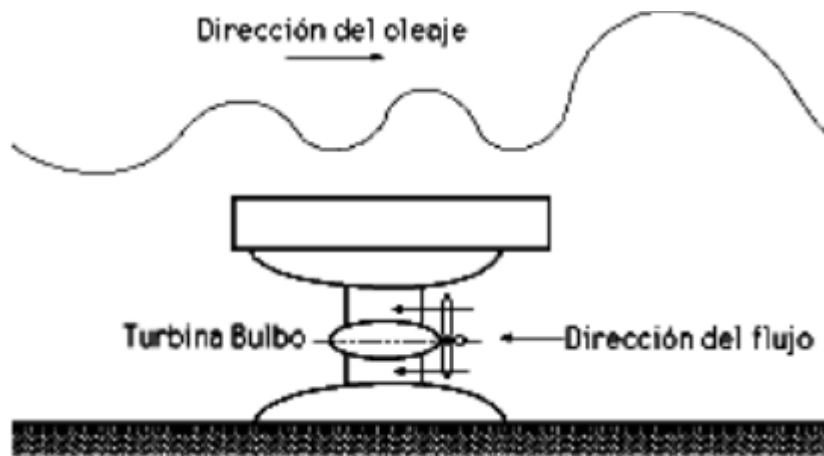


Figura 2.29: OWC Rompeolas Sumergido. [<http://ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>]

2.6.3.5. Sistema Alstom.

Alstom y el principal productor escocés de energía marina, SSE Renewables, formaron una empresa conjunta en el año 2012, para el desarrollo del proyecto Costa Head, con una capacidad de producción de 200MW de energía renovable, procedente de las olas. El proyecto se localiza en la isla de Mainland; perteneciente al archipiélago de las Orcadas, norte de Escocia.[14]

El emplazamiento de la Costa Head se encuentra a unos 5km al norte de la isla Mainland y tiene una profundidad de 60 a 75m. SEE Renewables y Alstom han realizado exhaustivos estudios del entorno, así como una evolución del impacto ambiental. El objetivo fue desarrollar inicialmente una primera fase con una capacidad aproximada de 10MW, para, posteriormente; completar el proyecto, hasta alcanzar los 200MW.

Fundada en 2004, AWS Ocena Energy se dedica al desarrollo y a la distribución de su convertidor de energía undimotriz AWS-III, un dispositivo flotante que cuenta con una potencia nominal de 2,5 MW. En 2010 se realizaron, en el Lago Ness, pruebas de este convertidor con un prototipo a escala 1:9. Los ensayos con dispositivos a escala real se iniciaron en 2012. Cuenta con el apoyo del fondo WATERS (Waves and Tidal Energy Research Development and Demonstration Support), gestionado por Scottish Enterprise.

En 2013, Alstom instaló una turbina mareomotriz de 1 MW en el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC) ubicado en Orkney, al norte de Escocia. Y allí sigue probando esta turbina, que ya ha llegado a la potencia nominal de 1 MW, "demostrando su capacidad de funcionamiento autónomo, y habiendo generado más de 500MWh, energía suficiente para abastecer a 600 hogares", indica la compañía.

En el año 2014, Alstom presentó una nueva evolución de su turbina mareomotriz; Ocade™ de 1,4MW, la cual ofrece importantes mejoras. Un mayor rendimiento y rentabilidad, junto con un mantenimiento más sencillo.

Es decir, da un paso más en el desarrollo de la plataforma Ocade™, con la cual quiere ofrecer tecnologías que permitan reducir el precio de la electricidad y maximizar la utilización de los recursos de las corrientes de las mareas, de acuerdo con las distintas condiciones legales (velocidad de la corriente y profundidad).

Las características técnicas de la turbina Ocade™, con un diámetro de rotor de 18m, y una potencia nominal de 1,4 MW y 3 palas de movimiento variable. La góndola es inteligente, es decir, puede rodar sobre su eje en función de la dirección de la marea, gestionando la pleamar y la bajamar de forma independiente y maximizando la producción de energía. El diseño de las aspas permite modificar su posición para controlar la carga de la turbina y optimizar las condiciones de las corrientes en el emplazamiento.

Está equipada, además, con módulos plug-and-play sobre raíles, accesibles a través de una escotilla de inspección en la parte trasera de la góndola, lo que permite un ensamblaje más rápido y un mantenimiento más sencillo. Además, su capacidad de flotación permite el remolque hasta el emplazamiento operativo. Esto reduce significativamente los costes de operación y mantenimiento dado que no se necesitan buques y buzos especializados, al tiempo que se acorta notablemente el tiempo de instalación o retirada de la turbina.

En 2010, La Crown Estate otorgó a SSE Renewables, la empresa de energía undimotriz y mareomotriz más importante de Escocia, derechos de exclusividad para el desarrollo del emplazamiento Costa Head. SSE, en colaboración con sus socios, está desarrollando en la actualidad la mitad de los 1.6 GW de concesiones de leasing otorgadas por la Crown State para la generación de electricidad a partir de energía

mareomotriz

y

undimotriz.

CAPÍTULO III: COSTE E IMPACTO AMBIENTAL

3. COSTE E IMPACTO AMBIENTAL.

3.1. COSTE.

La explotación de la energía del oleaje, como ocurre con muchas otras tecnologías renovables, precisa de altos costos de inversión. Los altos costes de capital se deben a la necesidad de construir grandes estructuras para captar una cantidad significativa de energía. Por otro lado, los costos de operación son relativamente bajos en los dispositivos costeros (bastantes más altos en los aparatos alejados de la costa), [15] ya que no existen costes de combustibles, y los costes de operación, reparación y mantenimiento anuales solo representan entre un 3 a un 8 por ciento de los costes de inversión. Sin embargo, habrá costes de seguros que podrán ser altos en los primeros años cuando la experiencia en la tecnología sea limitada. La tecnología de la energía del oleaje, como ocurre con la mayoría de las otras tecnologías renovables, solo es rentable si los costos de capital por kW instalado es menor de 1600€.

Una consecuencia de los altos costes de capital es que se obtienen altos periodos de payback. El coste de la energía obtenida con los aparatos captadores de la energía de las olas es altamente dependiente del interés. Se estima que los aparatos instalados en la costa tengan un coste de la unidad energética generada entre 0,09€/kWh y 0,14€/kWh. Los costes de los aparatos instalados fuera de la costa presentan una mayor dispersión, pero se estima que se encuentren en el rango comprendido entre 0,18€/kWh y 0,49€/kWh. Está claro que estos costes variarán de un país a otro, e incluso dentro de un mismo país, dependiendo del potencial del oleaje. La viabilidad económica de la explotación de la energía del oleaje será por tanto diferente de un sitio a otro. Se está observando que los costos de la electricidad obtenida con aparatos captadores de la energía del oleaje, y en particular los OWC ubicados en la línea de costa, se están aproximando cada vez más a los costes de la electricidad obtenida mediante el empleo de plantas convencionales de carbón. En la figura 3.1, donde se muestra la evolución prevista del coste de la energía producida, puede observarse la tendencia decreciente de los costes, en función del lugar de instalación, los cuales se han determinado considerando un coste de oportunidad del 8%.

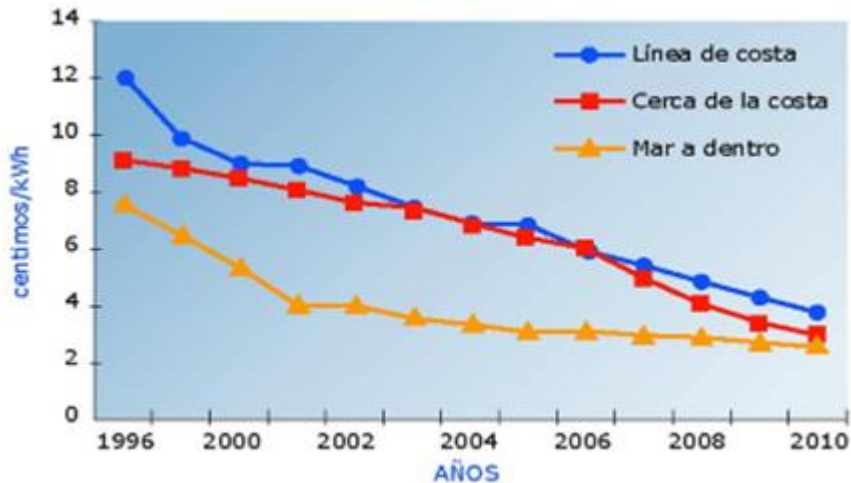


Figura 3.1: Evolución prevista del coste de la energía producida. [Fuente: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%C3%ADa%20del%20oleaje%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Energ%C3%ADa%20del%20oleaje%20(2).pdf)]

3.2. IMPACTO AMBIENTAL.

Los sistemas de aprovechamiento de la energía de las olas deben de resolver una serie de problemas antes de que sean ampliamente usados. De todas formas, hay que señalar que muchos de ellos solo afectan a los dispositivos ubicados en la costa.(16)

Entre los posibles impactos negativos pueden señalarse los siguientes:

- Impacto visual. El impacto visual depende del tipo de aparato y de su distancia de la línea de costa. En general, un sistema de boya flotante o una plataforma situada mar a dentro o un sistema sumergido, probablemente no presente mucho impacto visual. Cuando un área depende del turismo, la obstrucción visual es crítica.
- Ruido. Los sistemas de conversión de la energía de las olas producen ruido, aunque los niveles suelen ser menores que los ruidos de un barco. Cuando operan a plena carga, no se espera que sean más ruidosos que el viento o las olas, además, estos sistemas pueden ser contruidos con un buen material aislador de ruidos. El ruido generado puede viajar largas distancias debajo del agua y pueden afectar a ciertos animales, tales como las ballenas, las focas, etc. Se precisan más investigaciones para determinar si existen impactos en la vida de los mamíferos debido al ruido de estos aparatos.

- Molestias y destrucción de la vida marina. Los aparatos de captación de la energía de las olas pueden tener una variedad de efectos en el comportamiento del oleaje. Esto podría influir en las áreas de línea de costa y en las plantas y animales que viven en ella. Los sistemas ubicados en tierra requieren importantes modificaciones que afectan al impacto ambiental. Los impactos potenciales incluyen las molestias o destrucción de vida marina (incluyendo cambios en la distribución tipos de vida marina cerca de la costa). La instalación de las estructuras soporte y colocación de cables pueden interrumpir temporalmente la vida marina. Sin embargo, la ecología, probablemente, se recuperará. Los efectos de los aparatos alejados de la costa, probablemente, son pequeños (aunque grandes aparatos podrían tener efectos notables). Al absorber la energía de las olas, estos aparatos crean aguas en calma a su abrigo produciendo áreas válidas para actividades marinas, comerciales o recreativas. Las estructuras marinas en el océano proporcionan superficies apropiadas para que se desarrollen variedad de algas e invertebrados, que podrán colonizar los dispositivos. Por tanto, desde el punto de vista de la conservación de estos dispositivos, es necesario tomar medidas correctoras (inyección directa de bióxidos, utilización de productos antiincrustaciones, chorros a presión que desprendan a estos organismos de las estructuras, etc.) que eviten la destrucción de los mismos. Sin embargo, a menos que sean adecuadamente aplicados, estas medidas antiincrustaciones pueden tener un impacto adverso sobre la vida marina.
- Erosión de la costa. Los dispositivos de captación de la energía de las olas concentran la energía de estas en un área antes de su captación (por ejemplo, los sistemas denominados TAPCHAN). Estos tipos de aparatos concentradores pueden originar un incremento de la erosión de la costa. Una reducción de la acción del oleaje en zonas de la línea de costa puede incrementar el depósito de sedimentos.
- Conflictos con la navegación. Una vez instalados, los sistemas de captación de la energía del oleaje podrían ser un peligroso obstáculo para cualquier embarcación que no pueda verlos o detectarlos por radar. Para la mayoría de

los aparatos, esto podría superarse con técnicas convencionales (por ejemplo, luces, pinturas, reflectores, etc.)

- Interferencia con la pesca comercial y deportiva.
- Interferencia con otras actividades recreativas. Los sistemas de captación de la energía de las olas, si no están adecuadamente situados, pueden interferir con otros usos de las áreas de costa.

Por otro lado esta fuente de energía presenta una serie de ventajas, entre las que se pueden señalar:

- Se trata de un recurso renovable y sostenible.
- Es un recurso abundante.
- Se reduce la dependencia de los combustibles fósiles.
- No contamina.
- Es relativamente predecible.
- Es relativamente consistente (más que la mayoría de las fuentes renovables)
- Es modular.
- Elevada flexibilidad para su instalación (en tierra, cerca de la costa, mar a dentro)
- Se trata de una energía muy concentrada.
- Disipa la energía de las olas/protege la línea de costa.
- La economía local se desarrolla.
- Tiene múltiples aplicaciones (Generación de electricidad, Producción de hidrógeno por electrolisis, desalinización de agua por osmosis inversa, etc.)

CONCLUSIÓN

A modo de conclusión, y dando por finalizado el trabajo, decir que:

1. La energía undimotriz, es una de las energías renovables más prometedoras de la actualidad.
2. El coste de las tecnologías sigue siendo elevado. En este punto la energía mareomotriz está más avanzada que la undimotriz.
3. Se trata de un recurso concentrado, predecible, cercano a gran cantidad de consumidores y de alta disponibilidad; porque es un recurso abundante con flujos de energía elevados; es una energía renovable que no tiene emisiones contaminantes; teniendo otras aplicaciones a parte de la generación de electricidad, como la producción de hidrógeno o la obtención de agua potable del mar.
4. Esta energía no es beneficiosa al 10%, ya que tiene ciertos impactos ambientales y sociales.
5. El futuro que promete esta energía sumada a la eólica marina, no harían más que garantizar su éxito con los sistemas híbridos. Dichos sistemas combinarían un aerogenerador marino y un WEC en la misma estructura, conformando así una plataforma polivalente -que podría ser fija o flotante, y que, en esta última, el WEC serviría como atenuador de los movimientos de la plataforma de offshore flotante.

CONCLUSION

As a conclusion and ending the project just say that:

1. The wave energy is one of the most promising renewable of energies of today.
2. The cost of technologies remains high. At this point the tidal energy is more advanced than wave energy.
3. This energy must be taken into account, positively, since it is a concentrated, predictable resource, close to a big range of consumers and high availability; because it is an abundant resource with high energy flows; it is a renewable energy that has no polluting emissions; taking other applications out of the generation of electricity, like the production of hydrogen or the obtaining of drinking water from the sea.
4. This energy can not be considered as beneficial 100% because it has some environmental and social impacts.
5. The future that promise this energy added to the offshore wind, would not do more than guarantee its success with hybrid systems. These systems would combine a marine wind turbine and WEC in the same structure, thus forming a polyvalent platform that could be fixed or floating and that in the latter WEC would serve as an attenuator of the movements of the floating offshore platform.

BIBLIOGRAFÍA

Revista

[1] Mario Pelissero, Pablo A. Haim, Guillermo Oliveto, Francisco Galia y Roberto Tula. Aprovechamiento de la Energía Undimotriz. Proyecciones, Vol.9, No.2, Octubre de 2011.

[3] J. Pérez-Zapata, “Identificación y cuantificación del potencial de energía undimotriz en la costa del departamento del Atlántico, Colombia”, Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo, vol. 17 N° 2, pp. 93-102, Julio, 2017.

Páginas web

[2] <http://www.energyprofessionalsymposium.com>

[7] <http://www.ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>

[8] <http://www.ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>

[9] <http://www.ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>

[10] <http://www.ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>

[11] <http://www.ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>

[12] <http://www.ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>

[13] <http://www.ingenieroambiental.com/3008/4OLASCAP3.pdf>

[14] <http://www.alstom.com/es/spain>

[15] file:///C:/Users/Usuario/Downloads/hugepdf.com_energia-eduambiental.pdf

Libro

[4] UCHE MARCUELLO, JAVIER. La energía en el agua. Prensas de la Universidad de Zaragoza, 1ªed. 17/10/2013. ISBN: 841577009X

Manuales

[5] FERNÁNDEZ DÍEZ, P., 2002. “Técnicas para aprovechar la energía de las olas”. Publicación del departamento de Energía Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria.

Tesis doctoral

[6] Dan El Andrés Montoya Andrade .Director de la Tesis: Antonio de la Villa Jaen. Modelado y Control de Centrales Undimotrices Aplicacion a Sistemas Oscilantes y Osciladores de Columna de Agua. Sevilla, Marzo de 2014.

Trabajos

[16]Barragán Hernández, Deysi Jazmín.; Hernández Aguilar, Carlos Enrique; Ulín Madrigal, María Fernanda. ENERGÍA OCEÁNICA. “Una energía limpia, renovable y sostenible”. Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco. Ing. Electrónica 2 “A”. México a 7 de marzo de 2016.

Otra bibliografía utilizada de forma general:

- FERNÁNDEZ CHOZAS, J. (2008). “Una aproximación al aprovechamiento de las olas para la generación de electricidad”. Proyecto fin de carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Convocatoria: Septiembre, 2008.
- HEATH, J., SARMIENTO, A., NEUMANN, F., BRITO E MELO,A. PRADO, M., YEMN, R., TEDD,J., FRIIS-MADSEN, E.M KOFOED, J.P, KANAPP, W., RUSSEL, I., 2008.” Ocean Wave Energy. Current Status and future Perspectives”. Green Energyand Technology (Virtual Series). Ed. Springer Berlin Heidelberg.
- IDAE, 2011-2012, Evaluación del potencial de las olas.
- Modesto Amundarain Ormazá. 2012, La energía renovable procedente de las olas.
- EREC. (2010), Renewable Energy in Europe, Markets, Trends and technologies. European Renewable.
- Portugal, Tease, W.K., Lees, J. & Hall, A. (2007), Advances in Oscillating Water Column Air Turbine Development. Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference.
- Elsevier, 5, 50–55, Westwood, A. (2004), Ocean Power. Wave and tidal energy review.

