VII.- TÉCNICAS QUE APROVECHAN LA ENERGÍA DE LAS OLAS (III)

pfernandezdiez.es

VII.1.- ABSORBEDORES PUNTUALES

Son estructuras pequeñas en comparación con la ola incidente; suelen ser cilíndricas y, por lo tanto, indiferentes a la dirección de la ola; generalmente se colocan varias agrupados formando una línea. Los atenuadores y los absorbedores puntuales pueden captar energía de un frente mayor que el propio frente que ellos oponen, mediante un efecto antena.

Las válvulas de la cámara de alta presión permiten la entrada de agua en la misma, siendo la presión exterior más alta que la presión interna de la cámara. Si la presión exterior fuese menor que la interior las válvulas permanecerían cerradas y no habría flujo.

De igual forma, las válvulas en la cámara de baja presión sólo permiten que el agua fluya si la presión interior es más alta que la exterior; si la presión interior es menor que la exterior las válvulas siguen estando cerradas y no hay flujo.

Como las cámaras están a diferente presión, el agua fluye de la de mayor presión a la de menor presión, a través de las turbinas.

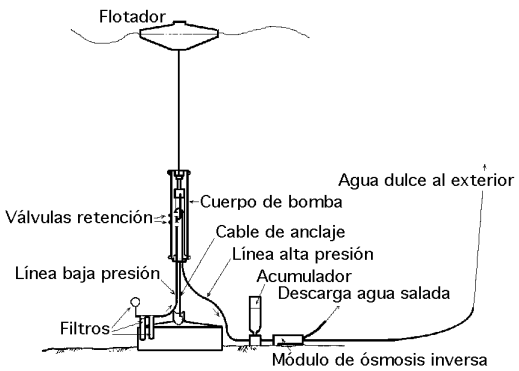


Fig VII.1.- Absorbedor puntual. Sistema de ósmosis inversa para la obtención de agua dulce

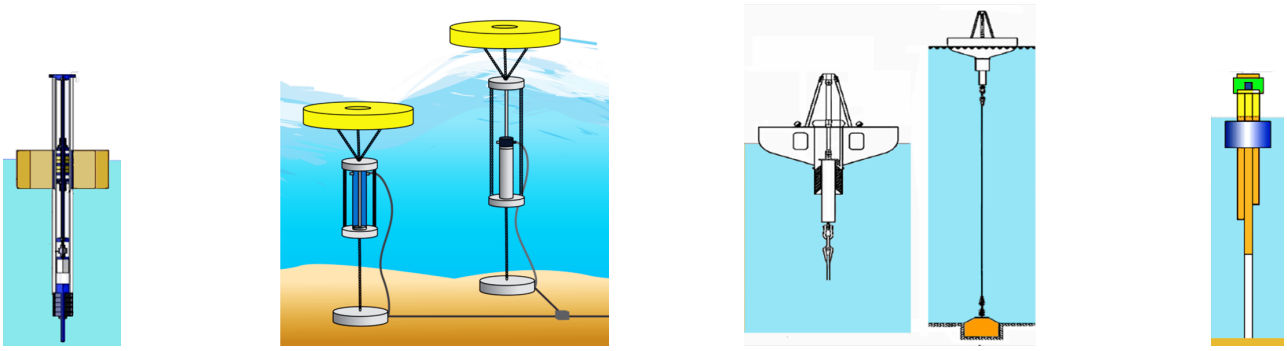


Fig VII.2.- Esquemas de boyas flotantes

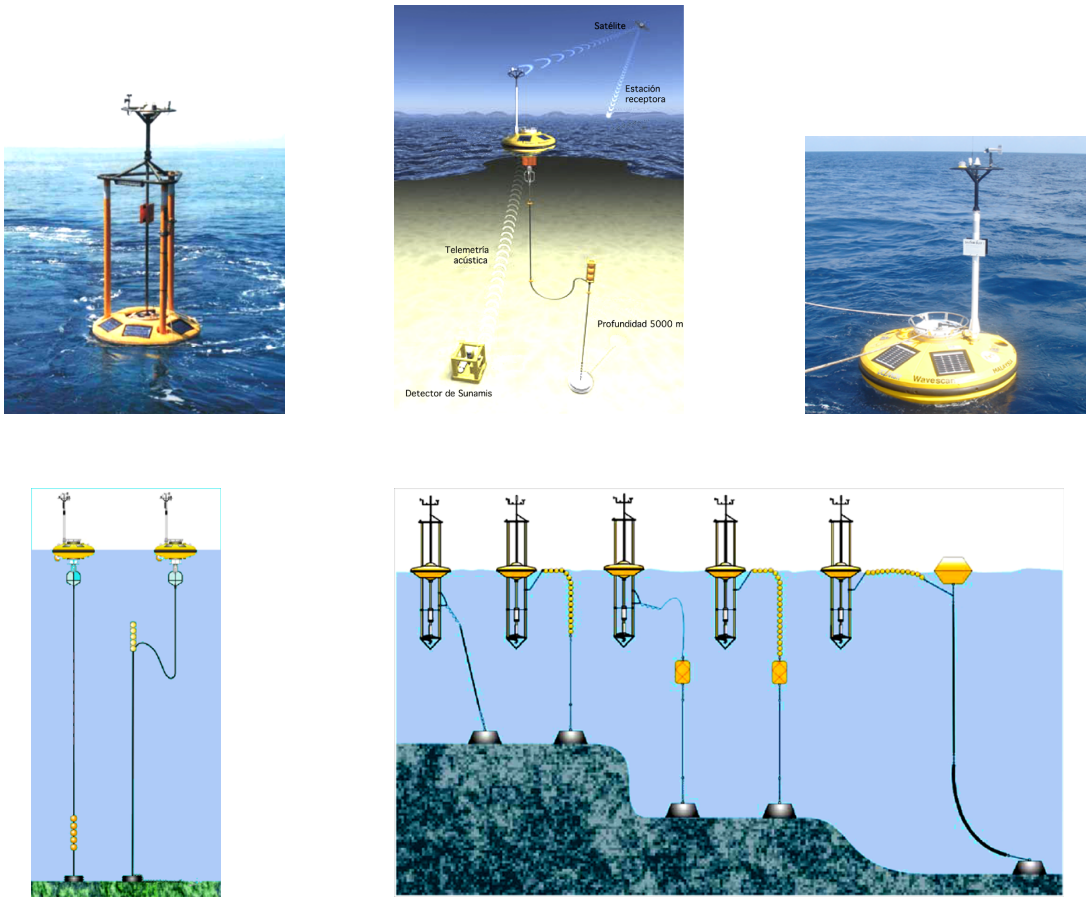


Fig VII.3.- Otros OWCs de boyas

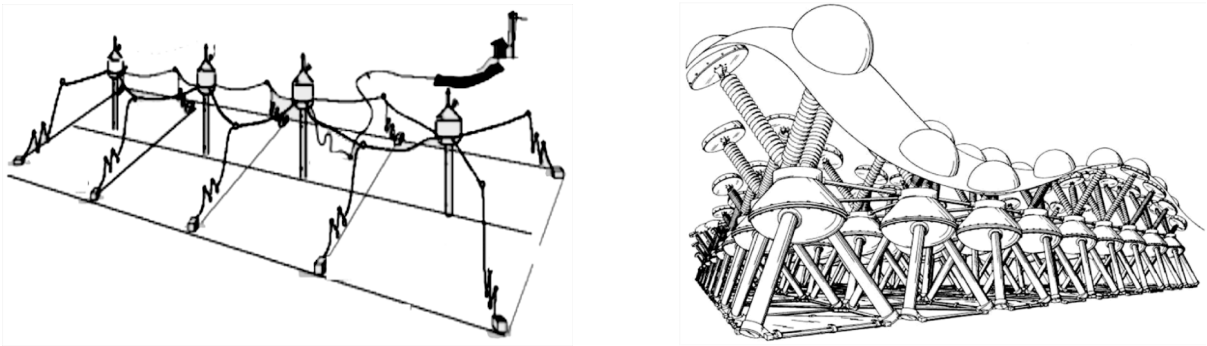


Fig VII.4.- ¿Parques de boyas flotantes futuristas?

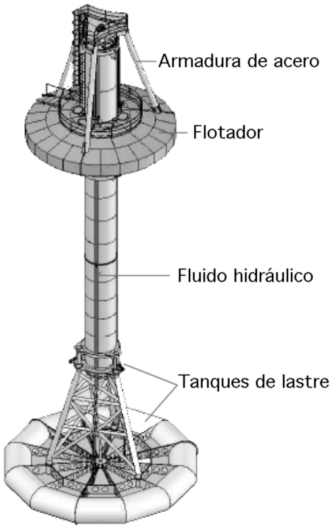


Fig VII.5.- OWC Sperboy

Sperboy^{TM}.- Desarrollado y patentado por Embley Energía (1998), es un convertidor flotante de columna de agua oscilante, similar a los diseñados para costa e instalaciones fijas, que consiste en dos estructuras, una flotante y otra sumergida. En la parte superior de la flotante, boya, encima de la columna de agua oscilante, van ubicadas las turbinas, generadores, y las instalaciones asociadas al sistema. El aire se desplaza por la columna de agua oscilante a través de las turbinas generadoras sobre la superficie del agua. El dispositivo se puede instalar en aguas profundas para maximizar la producción de energía. Todo el cuerpo flota y mantiene interacciones hidrodinámicas óptimas para las que prevalece el espectro de onda dominante, maximizando la captura de energía a coste mínimo.

La altura total del dispositivo es de 50 m, de los que 35 m están bajo el agua; su diámetro es de 30 m (2008).

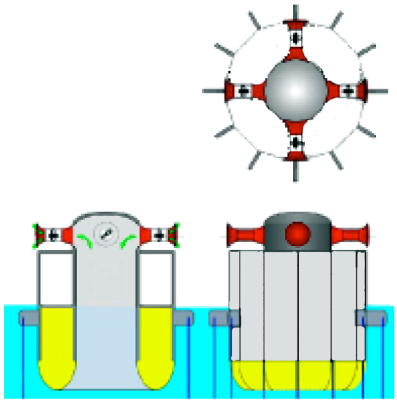
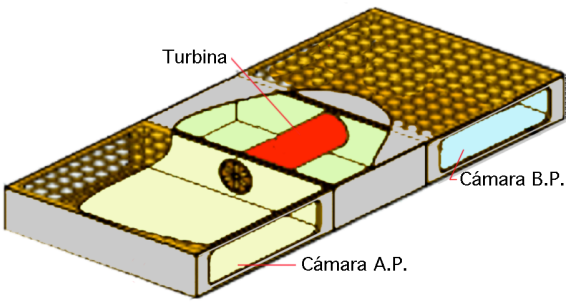
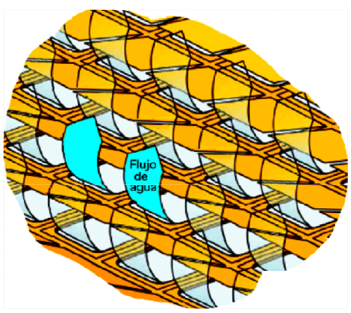


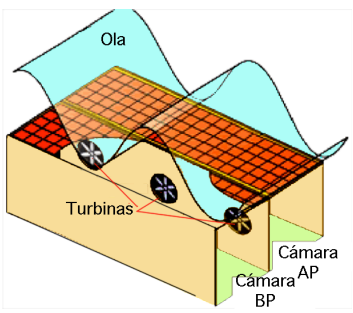
Fig VII.6.- Esquema de OWC Embley
Convertidor flotante de columna de agua oscilante de Embley Energy

OWC WaveMaster.- Consiste en dos cámaras de presión conectadas mediante unas turbinas Fig VII.7; está situado bajo las olas de forma que, en todo momento, el OWC está cubierto por el agua.

La superficie superior de cada cámara es una superficie activa cubierta con muchas válvulas unidireccionales que controlan el flujo del agua a través del OWC.







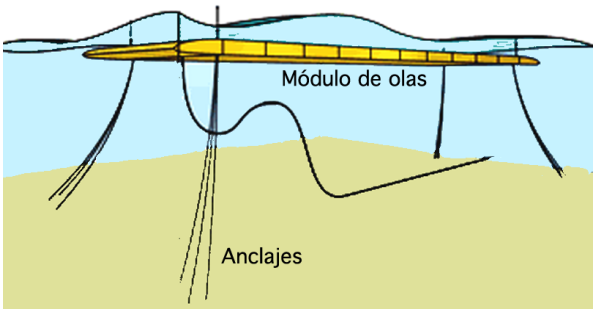


Fig VII.7.- OWC WaveMaster

OWC Dragon.- El Dragon es un dispositivo que eleva las olas del océano a un depósito sobre el nivel del mar, para posteriormente hacerla pasar a través de un cierto número de turbinas y de esta forma transformar la energía de las olas en electricidad; es una construcción muy simple, siendo las turbinas los únicos órganos móviles; se ancla en aguas profundas para aprovechar las olas antes de que pierdan energía cuando alcanzan el área costera. El dispositivo se diseña para permanecer tan inmóvil como sea posible, simplemente utilizando la inercia originada por el peso del agua que ha cargado.

El modelo final del Dragon se diseñará para estar ubicado, aguas afuera, en profundidades de más de 20 a 30 m, generando entre 4 a 11 MW, dependiendo de la actividad de las olas. El agua se almacena temporalmente en un gran depósito (5000 a 8000 m^3) que crea una carga, diferencia entre los niveles de la superficie del océano y la superficie del agua en el depósito, que acciona las turbinas de tipo Kaplan con generadores magnéticos permanentes de 250 a 450 kW por turbina

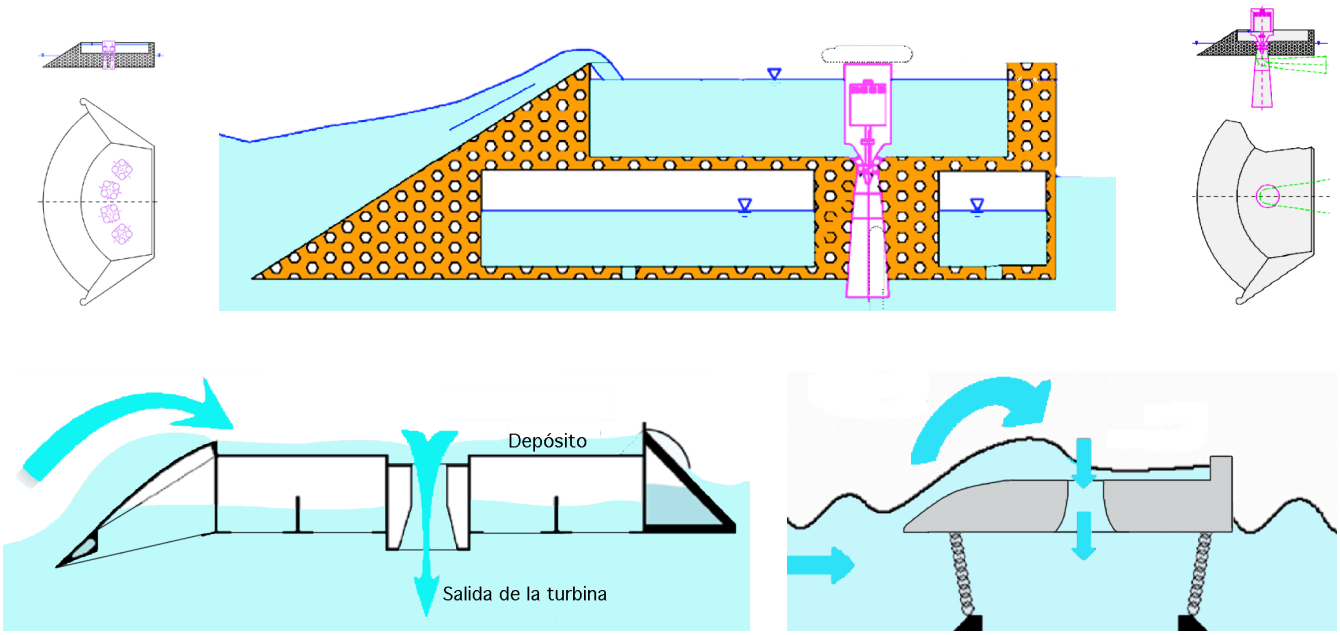


Fig VII.8.- Esquemas del Dragon Wave

La rampa del Dragon se puede comparar a una playa; es corta y relativamente escarpada para minimizar la pérdida de energía, ya que los frentes de olas se comportan igual que cuando se acercan a una playa modificando su geometría; la forma elíptica especial de la rampa optimiza este efecto, hecho que se ha comprobado en el prototipo, habiéndose observado que el rendimiento aumenta perceptiblemente.

Tabla VII.1.- Cuadro resumen de resultados prototipo-modelo final Dragón

	Prototipo	*Modelo final*
Media energética anual de las olas	*0,4 kWm*	*36 kWm*
Peso (hormigón, acero y lastre)	*237 Tm*	*33000 Tm*
Anchura	*54,5 m*	*300 m*
Longitud	*32,7 m*	*170 m*
Altura	*3,6 m*	*19 m*
nivel	*1,5 m*	*3 a 7 m*
Depósito de agua	*55 m³*	*8000 m³*
N° de hidroturbinas	*7*	*16 a 20*
Potencia media	*0,02 MW*	*7 MW*
Eficiencia de la turbina	*Con 0,7 m de altura, 87%*	*Con 3 m de altura, 91%*



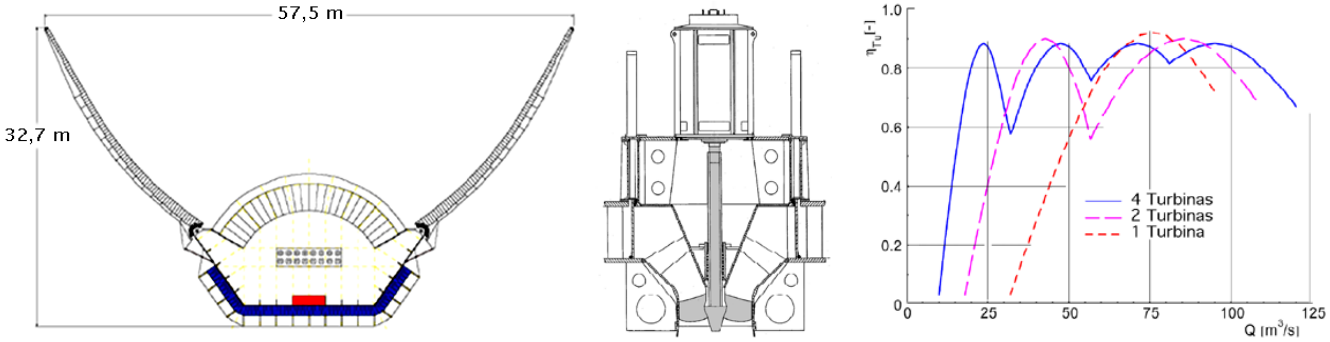


Fig VII.9.- Dimensiones y vista por arriba del prototipo.. Rendimiento en función del caudal para 1, 2 y 4 turbinas

OWC SSG.- La empresa noruega Bølgekraftwerk ha puesto a punto el SSG, que es una mezcla de varias técnicas, Fig VII.10. El agua, por el movimiento de las olas, sube por la rampa para ser conducida a las turbinas a través de una serie de depósitos a distintos niveles; su rendimiento es superior al 50%.

El SSG se basa en el almacenamiento de la energía potencial de las olas entrantes en varios depósitos colocados uno encima del otro; de esta forma, prácticamente todas las olas, independiente-

mente de su tamaño y velocidad, son capturadas para la producción de energía. La ola incidente desliza hacia arriba por una rampa (inclinación 35º) y en su retorno cae a unos depósitos, a partir de los cuales se hace pasar el agua a través de una turbina multietapa, (Multi-Stage Turbine, tecnología MST) integrada dentro de la estructura y que consiste en un cierto número de turbinas (tantas como depósitos) colocadas concéntricamente y conectadas por el mismo eje a un mismo generador. Para aprovechar las distintas alturas de las olas, la tecnología MST está diseñada para minimizar las secuencias de marcha/parada y seguir funcionando incluso cuando sólo uno de los depósitos suministre agua; el resultado es un elevado nivel de eficiencia.

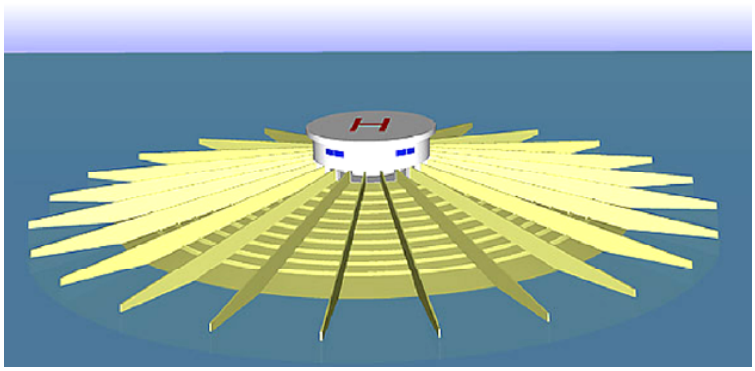


Fig VII.10.- Vista general del SSG en alta mar

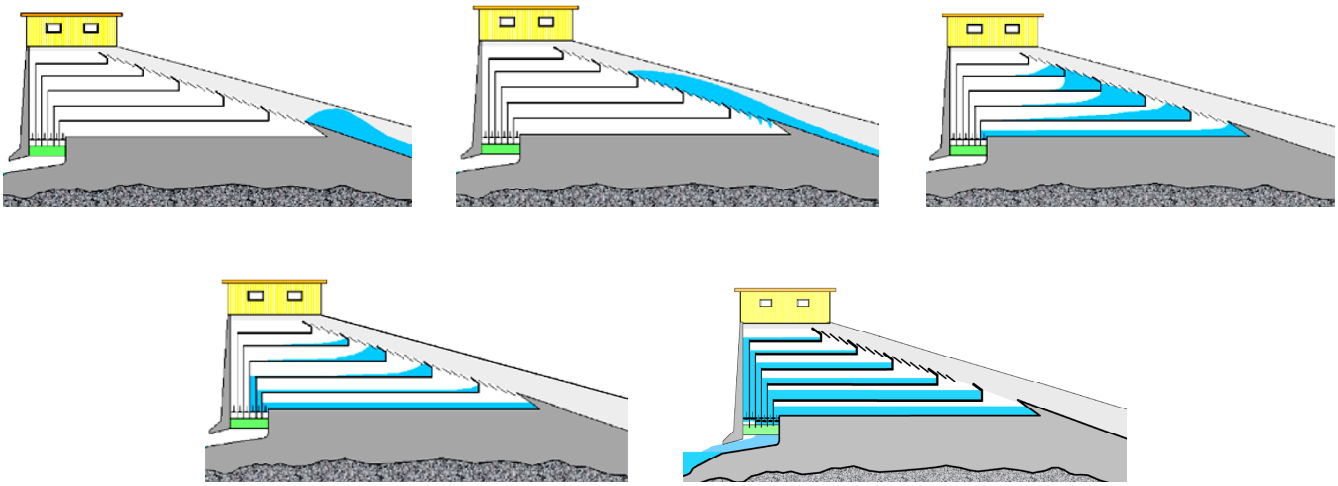


Fig VII.11.- Funcionamiento del SSG

El dispositivo SSG se puede instalar en:

- La costa, (el dispositivo se puede instalar en áreas de costa donde el paisaje natural tenga forma de cuña; aquí se crean olas altas y, por tanto, se incrementa la eficiencia del convertidor); esta instalación puede generar electricidad y producir hidrógeno

- Alta mar, (la instalación puede ser fija o flotante); cuando es fija también puede producir hidrógeno

- Un rompeolas, (es por ahora la mejor solución ya que puede utilizar la infraestructura de éste y así conseguir un coste asequible del convertidor disminuyendo los costes de instalación

La potencia almacenada en los depósitos del SSG debería ser, idealmente, la potencia de las olas incidentes, pero en realidad este almacenaje está limitado por $\begin{cases} \text{- } \textit{las dimensiones de la estructura} \\ \text{- } \textit{el tipo de turbina utilizado} \end{cases}$

La potencia en la cresta de la ola depende directamente de la altura de la ola, mientras que la potencia dentro de los depósitos depende de su nivel de agua; la potencia de la turbina se pierde parcialmente debido a la calidad hidráulica del diseño dando lugar a la potencia que realmente acciona al generador

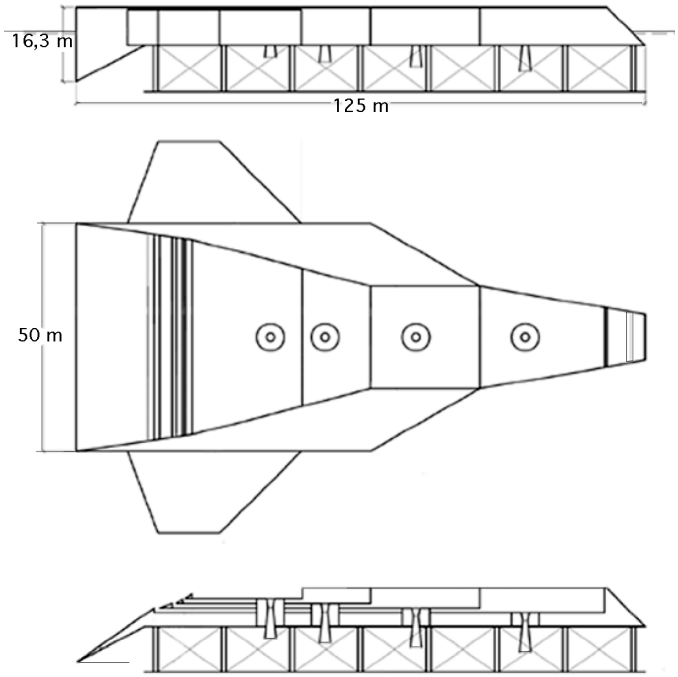


Fig VII.12.- Vistas del Power Pyramid multidepósito, danés, con dos tipos de depósitos

OWC Waveplane.- El Waveplane es un dispositivo flotante en forma de cuña, anclado al fondo del mar y dispuesto frontalmente al frente de olas, para aprovechar su energía y generar electricidad; permanece a nivel del mar, de forma que no monta las olas ni hacia arriba ni hacia abajo; frontalmente, bajo la línea de flotación, lleva una placa con canales que hace que la captura de energía de las olas sea más eficiente, recogiéndolas en un depósito cuya salida está conectada a un conducto, en cuyo otro extremo está instalada una turbina axial. La forma del depósito hace que el agua de las olas quede atrapada a diferentes alturas, penetrando vorticialmente a la entrada del tubo de la turbina. La parte de la ola que entra al depósito se corta en un número de "rebanadas de agua horizontales", dividiéndola en secciones con diferente cantidad de energía cinética y potencial.



La parte inferior de la ola capturada va asociada a la energía cinética, mientras que la parte más alta dispone de más energía potencial. El agua que entra en los

depósitos inferiores fluye directamente al conducto aprovechándose directamente la energía cinética en la turbina, mientras que la potencial se puede almacenar y usar cuando sea conveniente. Esta diferencia se aprovecha por el Waveplane para proporcionar un suministro de agua constante al conducto de entrada en la turbina durante todo el periodo de la ola. Los depósitos más altos tienen mayor capacidad de almacenamiento que los más bajos; la fracción de agua que fluye por los depósitos superiores se almacena y sólo se usa cuando la cresta de la ola ha pasado el dispositivo, Fig VII.13.

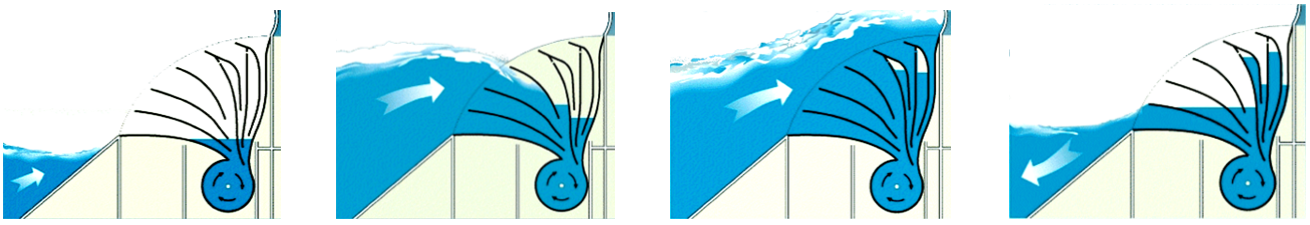


Fig VII.13.- Esquema de funcionamiento indicando las fases de llegada de la ola a la turbina del Waveplane

Mediante este proceso se aprovecha la mayor cantidad posible de la energía cinética del agua que se convierte en una corriente rotativa en la tubería de entrada a la turbina, que acciona el generador de energía (conectado a la red eléctrica) mediante una caja de engranajes; cuando el agua sale de la turbina se devuelve al mar.

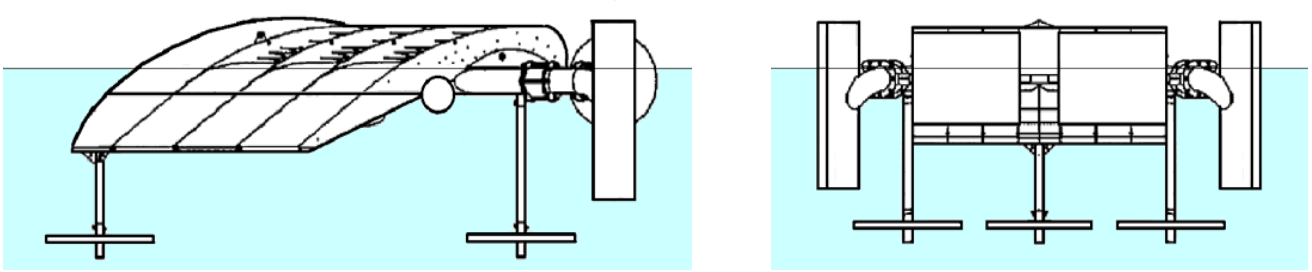


Fig VII.14.- Esquemas de diseño diversas del Waveplane

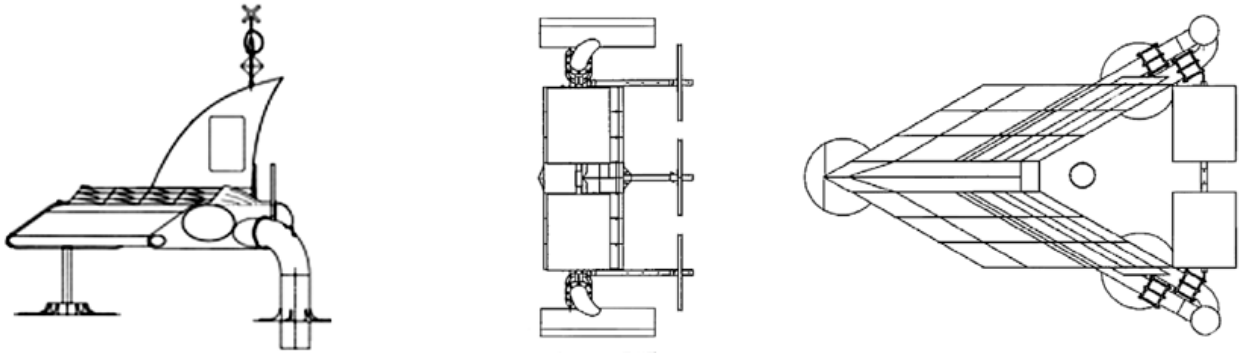


Fig VII.15.- Esquemas de diseño diversas del Waveplane

Todos los depósitos se van estrechando según se acercan al conducto de entrada a la turbina; el agua se comprime y por lo tanto su velocidad aumenta. Como la energía cinética varía con el cua-

drado de la velocidad del agua, un pequeño incremento de la velocidad proporciona un importante incremento de la energía cinética; toda el agua que pasa por los depósitos del Waveplane se comprime dentro del conducto a la turbina, adquiriendo un movimiento de remolino, cuya rotación es tan fuerte que continua durante dos o tres periodos de falta de olas, incluso cuando el agua entrante al Waveplane sea de forma irregular, la conversión del flujo a través del conducto a la turbina lo transforma en un flujo de rotación uniforme.

En el prototipo hay tres placas, una por debajo del frente de olas y dos conectadas a dos tubos; se mantiene a flote mediante tanques llenos de espuma, transformando la forma y velocidad de la ola entrante. Es la primera central eléctrica que aprovecha la energía de las olas, transformando su movimiento irregular en una corriente que gira uniforme y rápidamente.

Se han desarrollado dos sistemas:

El Oxygen-Waveplane, que se utiliza para oxidar zonas marinas con contenido bajo en oxígeno
El Energy-Waveplane, que genera electricidad mediante turbinas hidráulicas

Se puede emplear en cualquier aplicación donde existan corrientes de agua, por ejemplo convirtiendo el agua de mar en agua dulce, o eliminar derrames de aceite, o extraer minerales del agua de mar o filtrar aguas contaminadas, etc.

Cuando la parte inferior de la ola golpea la playa artificial, se acelera un poco por abajo, por lo que la parte superior de la ola es proyectada hacia adelante sobre el dispositivo, aprovechando sobre todo la cresta de la ola, que permanece sobre el nivel del agua.

OWC Archimedes Wave Swing, AWS.- Es un absorbedor puntual, oscilador de olas totalmente sumergido, que consiste en dos cilindros; el inferior está fijado al fondo del mar, apoyado en su base a unos 43 m de profundidad, mientras que el superior (flotador) se mueve alternativamente hacia arriba y hacia abajo bajo la influencia de las olas, estando su base superior entre 6,5 y 9,5 m bajo el nivel del mar. Su diámetro es de 9,5 m

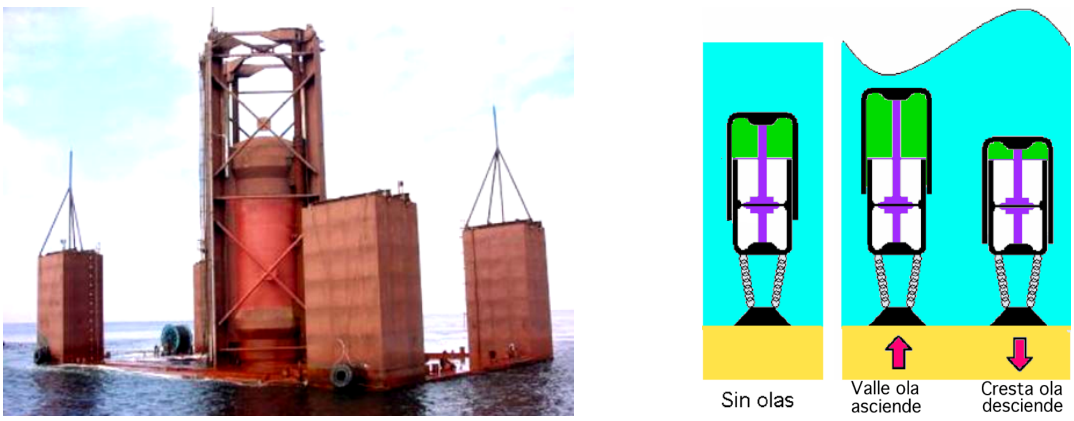


Fig VII.16.- Archimedes wave swing, instalado en Portugal

El El AWS va sumergido y, por lo tanto, evita los inconvenientes de las tormentas a las que están sometidos otros dispositivos, lo que reduce costes de amarre y riesgo de daños. Es muy simple ya que tiene una parte móvil principal, y auxiliares limitados que reducen grandemente los riesgos y el mantenimiento.

OWC FO³ de Fred Olsen Lda.- Es el proyecto de energía de las olas más avanzada que la mayoría de sus competidores. Consiste en un sistema de absorbedores puntuales (boyas) que funcionan en dos direcciones, y extraen la energía de las olas mediante cilindros y motores hidráulicos, unidas a una plataforma flotante de fibra de vidrio reforzado, que es ligera y estable.

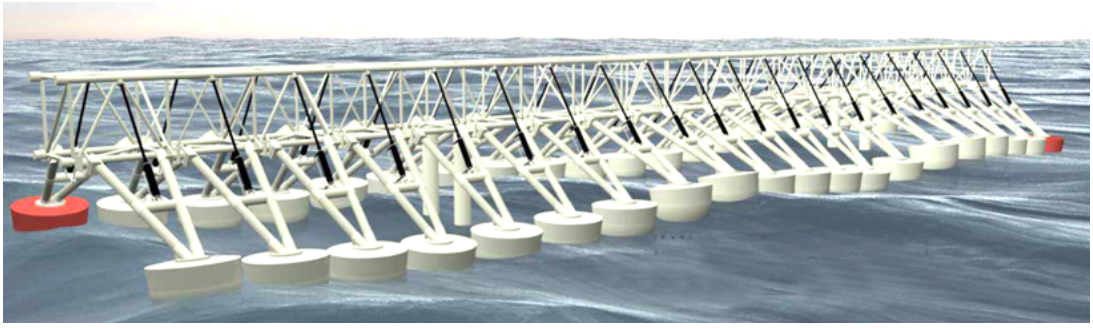
Las boyas, movidas hacia arriba y hacia abajo por las olas, capturan su energía que se convierte en electricidad mediante un sistema hidráulico cuyo movimiento vertical se transforma en otro de rotación, que acciona un generador eléctrico.

Especificaciones: Tamaño de la plataforma prototipo: 16 x 16 x 14,5 m; peso 1150 Tm.; profundidad del mar entre 30 y 100 m; generación entre 1,5 y 2,5 MW con olas de 16 kW/m; una plataforma a escala real tendría 33 x 33 x 25 m, con 21 boyas.



Fig VII.17.- Prototipo ***OWC FO³*** *y parque ficticio* ***de Fred Olsen Lda***

OWC Wave Star en Nissum Brednin.- Se caracteriza por utilizar tecnologías conocidas tanto marinas como de turbinas; es fundamentalmente diferente a muchos otros modelos de energía de las olas, ya que la máquina no forma una barrera contra las olas, con el fin de aprovechar la totalidad de su energía, sino que va colocada perpendicular a la dirección de la ola; de esta forma las olas discurren a lo largo de la máquina, siendo aprovechada su energía en un proceso continuo.



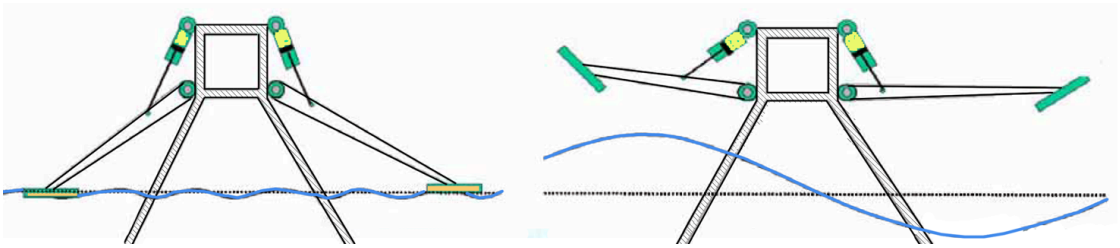




Fig VII.18.- Protipo a escala 1/10 del ***Wave Star, en Nissum Brednin, y algunas formas operaativas***

A cada lado de la máquina hay 20 flotadores de forma hemisférica, parcialmente sumergidos en el agua. Cuando una ola se propaga a lo largo del dispositivo, el primer flotador se levanta, luego el segundo y así sucesivamente, hasta que la ola disminuye. Los flotadores están colocados en la base de su propio cilindro hidráulico y funcionan continuamente para aprovechar la energía. Cuando un flotador asciende por efecto de la ola, acciona el pistón del cilindro de aceite al que va asociado, creando una presión de hasta 200 bar, presión que impulsa un motor hidráulico conectado al generador de electricidad. El sistema es óptimo para funcionar con olas relativamente pequeñas, lo que a su vez significa el 95% de la energía del oleaje anual disponible; por eso puede funcionar tanto en el Mediterráneo, como en el Mar del Norte, ya que:

- Está diseñado para funcionar con alturas de ola desde 0,5 m a un máximo de 6 m

- Si las olas superan los 8 m, los flotadores se elevan sobre el agua, siendo éste el modo de protección contra tormentas, quedando sólo expuestos a la acción del viento

- Todas las piezas móviles están por encima del agua protegidas de la humedad

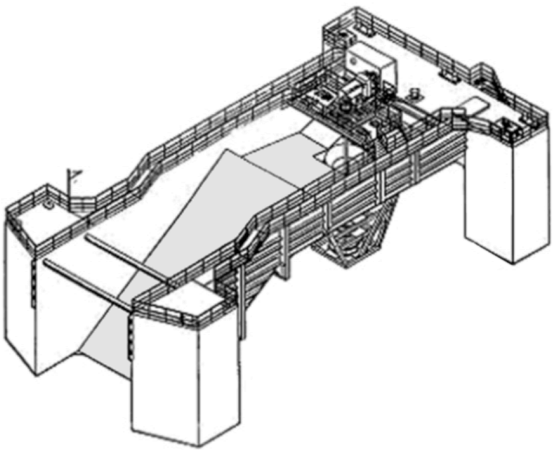


Fig VII.19.- OWC Floating Wave Power Vessel

El ***OWC Floating Wave Power Vessel,*** es un dispositivo de rebosamiento para funcionar en alta mar, desarrollado por Sea Power International, Suecia. Se compone de una estructura apoyada en cuatro tanques de lastre flotantes; un sistema de anclaje patentado permite

su orientación en la dirección más energética de las olas; se ha desarrollado un prototipo piloto, 1980, cerca de Estocolmo, Suecia, mientras que para 2002 estaba previsto otro de 1,5 MW a instalar en una zona de 50 a 80 m de profundidad, 500 m mar adentro, en Mu Mess, Shetland.

Tabla VII.2.- Comparación de algunos OWCs daneses con otros OWCs europeos

Sistemas daneses	*Potencia instalada en kW*	*Energía anual absorbida kWh*	*Eficiencia energética*	*Producción eléctrica anual kWh (Ean)*	*Rendimiento instalación*	*kW/m³ año Ean /V*	*kWh/Ton año Ean/M*
Swan DK3	*203*	*$4{,}41.10^5$*	*54 %*	*238.267*	*11 %*	*1191*	*1191*
Piont absorber	*78*	*$1{,}473.10^5$*	*72 %*	*106.074*	*8 %*	*530*	*295*
Bølgehøvlen	*6*	*$0{,}41.10^5$*	*81 %*	*32.920*	*2 %*	*716*	*716*
Bølgemøllen	*15.000*	*$3{,}98.10^7$*	*85 %*	*33.841.050*	*20 %*	*159*	*548*
Wave Dragon	*3160*	*$3{,}58.10^6$*	*81 %*	*2.897.969*	*11 %*	*145*	*161*
Bølgeturbinen	*14*	*$0{,}52.10^5$*	*85 %*	*27.122*	*1 %*	*3989*	*679*
Wave Plunge	*110*	*$2{,}55.10^5$*	*72 %*	*183.889*	*9 %*	*1532*	*613*
Bølgepumpen	*15*	*$0{,}94.10^4$*	*72 %*	*6.783*	*1 %*	*141*	*96*
DWP-system	*120*	*$2{,}36.10^5$*	*72 %*	*198.875*	*14 %*	*994*	*186*
OTROS							
Planta de Pico	*400*	*$9{,}88.10^5$*	*54 %*	*539.160*	*18 %*	*385*	*95*
Pelamis	*597*	*$1{,}3.10^6$*	*72 %*	*935.302*	*5 %*	*813*	*1559*
Mighty Whale	*110*	*$3{,}98.10^5$*	*54 %*	*214.920*	*3 %*	*49*	*167*

VII.2.- SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Una de las características del oleaje es su variabilidad, tanto a corto como a largo plazo, lo que implica que la conversión de la energía del oleaje en electricidad, es más eficiente cuando el generador tiene una velocidad variable.

Generador isosíncrono a velocidad variable.- Es un generador convencional modificado, que permite la generación de electricidad (a tensión y frecuencia constantes), independientemente de su velocidad. Mantiene unas eficiencias aceptables sobre una banda ancha de velocidades de rotación; por ejemplo, la eficiencia para una velocidad síncrona de $\begin{cases} 900\ rpm\ es\ el\ 90\% \\ 1800\ rpm\ es\ el\ 54\% \end{cases}$, siendo aconsejable para la generación a gran escala y conexión a la red, y no para redes pequeñas en islas.

Generador eléctrico convencional de corriente alterna.- Para determinados usos se puede emplear un generador convencional de corriente alterna, con posterior rectificación de la misma, que permita la generación a velocidad variable. Para generación en altamar, la energía se puede transportar a tierra como corriente continua, que resulta más económica.

VII.3.- SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

La energía del oleaje es una fuente muy irregular e imprevisible, por lo que es necesario un almacenamiento temporal de la misma; la elección del sistema de almacenamiento depende de:

- *El tipo de conversión directa a electricidad o bombeo de agua*
- *La necesidad de garantizar un suministro continuo (generación aislada o conexión a la red)*

Cuando el OWC es un dispositivo que bombea agua, existe la posibilidad de almacenarla en embalses para su posterior turbinación y generación de electricidad, lo que implica que el OWC se puede encontrar a una distancia razonable de la costa.

En otros sistemas como el Tapchan se puede efectuar el bombeo, con o sin previa generación de electricidad, empleando turbobombas. La energía E almacenada en una altura H (m) y volumen V (m^3) es:

$$E\,(kW) = 0{,}022\,H\,V$$

por lo que para generar 1 kW, sería necesario turbinar 45,5 m^3 de agua desde 10 m ó 10 m^3 de agua desde 45,5 m.

La potencia es: $N\,(kW) = \dfrac{\gamma\,Q\,H}{102\,\eta} \approx 8\,H\,Q$, *con H en (m) y Q en* (m^3/seg)

La viabilidad y rentabilidad de un sistema de almacenamiento de energía (Tapchan) depende de la morfología de la zona donde vaya ubicado el embalse, siendo el bombeo la única forma lógica de almacenar energía en largos períodos de tiempo. También se puede utilizar el bombeo de agua en piscinas de acuicultura, en donde se cultivan algas o peces.

Tabla VII.3.- Fuentes de energía marina; potencial renovable

Tipo de aprovechamiento	*Potencial renovable MW*	*Localización*	*Densidad energía*	*Desarrollo*
Gradientes térmicos	4.10^{10}	*Alta mar. Zonas tropicales*	*Elevada*	*Disponible*
Gradientes de salinidad	$1{,}4.10^{9}$	*Áreas muy localizadas*	*Elevada*	*Para 2050*
Biomasa marina	*10.000.000*	*Zonas costeras. Muy extendida*	*Baja*	*Disponible*
Corrientes marinas	*5.000.000*	*Áreas muy localizadas*	*Elevada*	*Para 2020*
Mareas	*3.000.000*	*Áreas muy localizadas en la costa*	*Elevada*	*Disponible*
Oleaje	*2.500.000*	*Muy extendido. Zonas costa y altamar*	*Media*	*Disponible*
Vientos marinos	*más de 20.000.000*	*Muy extendido. Zonas costa y altamar*	*Media*	*Disponible*

Otras formas de almacenar la energía de las olas, siendo su capacidad de almacenamiento función de la energía almacenada, en peso, pueden ser:

- *Compresión de gases (300 kg/kW)*
- *Acumulador hidráulico (130 kg/kW)*
- *Resortes de acero (11250 kg/kW)*
- *Batería ácida de plomo (56 kg/kW)*
- *Batería Ni-Cd (33 kg/kW)*
- *Volantes de inercia (18 kg/kW), etc*

Los volantes de inercia pueden mantener la potencia durante tres minutos seguidos, intervalo en el que la potencia suministrada puede variar en un ±50%.

- *En la turbina Wells, la masa del volante se incorpora en el propio rodete*
- *Para igualar las variaciones durante un día se utilizan baterías*

- Almacenar la energía durante más de un día no resulta económico

- En la producción aislada, se puede utilizar un sistema híbrido con generador Diesel

Desalación del agua del mar.- La producción de agua potable es, posiblemente, el mejor uso de la energía del oleaje, si existe una demanda adecuada para este tipo de recurso; la desalación se puede efectuar por procesos:

- Térmicos (evaporación, destilación), eléctricos (electrodiálisis)

- Fisicoquímicos (ósmosis inversa), utilizando directamente la energía mecánica producida por el oleaje

El proceso de ósmosis inversa consiste básicamente en que el agua del mar atraviesa una membrana semipermeable, que retiene las sales disueltas. La presión del agua es del orden de 55 bars, y la energía necesaria del orden de 6 kW/m^3.

La mayoría de los diseños actuales de sistemas para conversión del oleaje son aptos para generar altas presiones de agua, habiéndose diseñado algunas bombas de alta presión, como la Delbuoy, que lo fue expresamente para ósmosis inversa en la universidad de Delaware. El precio actual del agua desalada por ósmosis inversa es de algo más de 1 €/m^3, (en una planta de 200 m^3 diarios), siendo la mitad costes de energía.

VII.4.- GENERACIÓN EN ALTAMAR

La conversión del oleaje a gran escala en altamar es posible, con potencias entre 300 MW y 2 GW, mediante sistemas Duck, Cilindros Bristol y boyas de pistón. Por su tamaño y distancia a tierra, surgen una serie de problemas de instalación, mantenimiento, anclaje, transporte de la energía, modificación del oleaje a sotavento, interferencia con el tráfico marítimo, etc.

La industria petrolífera ha colaborado en la instalación de plataformas que pueden ser útiles en la implantación de OWCs en altamar, en procedimientos de instalación y transporte. En cuanto al anclaje, el problema es diferente, por cuanto las plataformas se diseñan para oponer la mínima resistencia al oleaje, mientras los OWCs son todo lo contrario. Los costes de amarre y anclaje pueden ser del orden de la mitad de los costes totales.

El diseño de los componentes se tiene que adaptar a la capacidad de los transportes existentes.

Sistemas híbridos.- Un mercado para la energía del oleaje, y las energías renovables en general, es el abastecimiento de comunidades aisladas, en donde no exista una red eléctrica.

Dada la irregularidad del recurso, el abastecimiento de la población solo se puede garantizar mediante un almacenamiento temporal de la energía, o con una combinación de fuentes de generación mediante generadores eólicos, generadores Diesel, energía solar, etc.

Ejemplos de sistemas híbridos con energía del oleaje existen pocos, siendo los únicos represen-

tantes las boyas de navegación en las que la batería se carga con energía del oleaje. El problema del almacenamiento de la energía del oleaje es en gran parte similar al de la energía eólica.

VII.5.- SISTEMAS DE TRANSPORTE ENERGÉTICO

Transporte de energía eléctrica.- El transporte de energía eléctrica por cable se considera factible hasta distancias del orden de 100 km. La longitud máxima de cables con corriente alterna es de 30 a 35 km por lo que para distancias que superen este valor, la transmisión sería con corriente continua. Los puntos débiles de los cables son: conexión a la plataforma flotante, reparación, juntas (longitud de cables de hasta 10 m), sedimentos y movimientos del fondo marino, etc. Se han obtenido experiencias con un cable blindado de 6,6 kV y 3 km de longitud en las pruebas del Kaimei, durante siete años, sin daños de importancia. Recientemente se ha desarrollado un cable eléctrico de 260 km de longitud para transporte de 6 MW, entre Alemania y Suecia.

Transporte por transmisión hidráulica.- El medio de transporte hidráulico sería agua salada o dulce, a alta presión, 100 a 200 bar. Este sistema es interesante cuando el OWC es hidráulico, como el Cilindro Bristol y los Rafts; la presión se produciría directamente en la conversión secundaria. La ventaja de la transmisión hidráulica es, sobre todo, de acceso y mantenimiento, si el equipo electromecánico se puede ubicar en la costa. Uno de los problemas es la variación del flujo en la tubería, que la puede dañar por la aparición de vibraciones. Se puede resolver mediante un acumulador hidráulico previo; existen tuberías de alta presión de diámetro de hasta 1,22 m. La velocidad máxima estaría en torno a 4,3 m/seg para reducir pérdidas de carga; se estima que se pueden transportar entre 50 MW y 70 MW por una tubería de 1 metro de diámetro.

Otras formas de transporte y uso de la energía.- Si el OWC está ubicado a más de 100 km de la costa, el transporte de la energía por conexión permanente no sería económico. En este caso la energía se puede transportar en barco, en forma de productos elaborados en alta mar.

- *Una opción era el puente electroquímico, utilizando grandes baterías de Li montadas sobre barcos*
- *Otra sería la fabricación de combustibles sintéticos en altamar, H_2 y NH_3, o la gasificación de carbón*

En el fondo del mar abundan minerales como el uranio e hidrocarburos (petróleo). En Japón se está estudiando la extracción de minerales en altamar. Se estima que con 1 kWh de energía del oleaje, se podría extraer uranio para 10 kWh en una planta nuclear. También se puede pensar en la fabricación de aluminio en alta mar.

VII.6.- IMPACTO AMBIENTAL

Los OWCs en el litoral o cerca de él pueden tener impactos considerables sobre el medio ambiente. La absorción y modificación del oleaje puede variar la morfología de la costa y de la vida marina. Sus efectos positivos pueden ser la disminución de la erosión de playas, o la creación de zonas tran-

quilas para recreo o cultivos pesqueros, siendo de esperar que la variación de los procesos en el litoral afecten a las zonas de reproducción de la vida marina.

Otros impactos, de tipo visual y sonoro, hay que tenerlos en cuenta, especialmente en zonas turísticas, estando asociado el problema del ruido a OWCs neumáticos que emplean turbinas de aire a alta velocidad tipo Wells. En zonas habitadas habría que emplear silenciadores, que reducen la eficiencia.

Medio ambiente.- El aprovechamiento en altamar, lejos de la costa, no implica ningún problema estético; habría que estudiar cómo afecta al oleaje en la vida marina, por cuanto éste asegura la circulación del oxígeno y de nutrientes en las aguas superficiales. El problema depende del sistema que se emplee. Los Ducks pueden absorber casi la totalidad del oleaje, en una banda muy ancha de frecuencias, de forma que colocados en largas cadenas, como terminadores, pueden dejar el mar en calma. Menos efectos tienen los resonadores que absorben las olas de frecuencias determinadas, dejando pasar olas con otras frecuencias. Desde el punto de vista ecológico, también serían preferibles absorbedores puntuales, que no modifican demasiado el oleaje a sotavento.

Cuando el medio de transmisión de la energía es el aceite, como en el caso de los Ducks, las pérdidas de éste pueden perjudicar el medio ambiente. El anclaje de los OWCs en el fondo marino, sobre todo en el caso de los terminadores, puede actuar como una barrera para los flujos de sedimentos, que puede resultar en una alteración del fondo marino. También hay que tener en cuenta la posible presencia de grandes animales, que pueden dañar a las instalaciones, o ser dañados por éstas.

Resumiendo, los efectos sobre el medio ambiente dependerán estrechamente del tipo de dispositivo utilizado, pudiéndose citar en principio algunos aspectos que deberían ser tenidos en cuenta en un proyecto de esta naturaleza:

- El clima marítimo se altera (sedimentos; ecosistema)
- Emisión de ruido; intrusión visual
- Efectos sobre lo reproducción de algunas especies. y sobre lo sedimentación en costas y playas
- Riesgos para lo navegación
- Posibles beneficios: amortiguamiento del oleaje en zonas portuarios o erosionables

Propulsión de barcos.- Otro posible uso de la energía del oleaje, sería la propulsión de barcos. El movimiento relativo del barco con respecto a la superficie del agua, se puede aprovechar mediante medios mecánicos o neumáticos, colocando estabilizadores sumergidos.

VII.7.- POTENCIA DE LOS OWCs

La mayoría de los diseños de OWCs operan con potencias entre 100 kW y 1 MW aproximadamente; sin embargo, en grandes aprovechamientos del orden de GW, la potencia por unidad de OWC tendría que ser muy superior, como en el caso de los Ducks y Cilindros. Una central de 100 MW con-

sistiría más bien en 1000 unidades de 100 kW, que en 200 unidades de 500 kW.

La tendencia con respecto a la potencia por unidad, es similar a la de los aerogeneradores, y aunque se han construido aerogeneradores de varios MW de potencia, el tamaño comercial parece estar entre los 100 y 500 kW.

Para caracterizar la potencia de un OWC se introduce un factor de capacidad F_c de la forma:

$$F_c = \frac{E_{anual}}{E_{máx\ teórico}}$$

en la que:

- E_{anual} *sería la energía media generada en un año*
- $E_{máx.\ teórica}$ *sería la posible energía generada cuando el OWC funcionase a potencia nominal todo el año*

Para que la producción energética del OWC sea grande comparada con la inversión, el OWC tiene que operar cerca de su potencia nominal durante gran parte del tiempo.

De esta forma, se pierden los picos del régimen del oleaje, que no tienen demasiada importancia, dado que el recurso es gratis y casi ilimitado; el factor de capacidad para un OWC suele ser del orden del 40% , y para aerogeneradores del orden del 30% al 35%.

VII.8.- SUPERVIVENCIA DE LOS OWCs

Tormentas.- Los OWCs se tienen que diseñar para sobrevivir en condiciones de olas extremas. Las consecuencias de tormentas ya se han experimentado con uno de los primeros prototipos de OWCs, cuando en 1988 el Kvaermer OWC fue destruido por una ola de 20 m de altura.

La altura de la ola se puede reducir considerablemente en aguas poco profundas; su energía se pierde debido a la fricción con el fondo y posterior rotura.

El coste de un OWC y el coste de la energía generada dependen en gran medida del cálculo de la ola. Los sistemas sumergidos, como el Cilindro Bristol, el rompeolas sumergido, o los OWCs sumergibles como la boya de pistón, son sistemas a los que afecta menos las tormentas.

Mareas.- Las mareas son desfavorables para el aprovechamiento del oleaje; su impacto sobre el rendimiento del OWC depende del sistema empleado. OWCs con rampas fijas, sólo pueden operar en zonas con pequeñas mareas, mientras que OWCs flotantes quedan menos afectados.

Los diseños para OWCs han de tener en cuenta los niveles mínimo y máximo que puede alcanzar la marea; en algunas zonas del mundo con altos coeficientes de mareas, lugares donde se están estudiando centrales maremotrices, se puede excluir prácticamente el aprovechamiento del oleaje.

VII.9.- CONSIDERACIONES FINALES

Consideraciones económicas.- La economía de un OWC se puede expresar en coste de electricidad; el coste del kWh generado sería el cociente entre los costes anuales del OWC y su producción anual. Para comparar los OWCs con centrales de generación convencional, habría que incluir el beneficio medio ambiental de las energías renovables

Los costes anuales de una central convencional se resumen en:

- *Costes de amortización del capital invertido*
- *Costes de operación y mantenimiento*
- *Costes de combustible*

La determinación de la producción anual se basa en:

- *Disponibilidad del recurso*
- *Eficiencia de captación y de generación*
- *Disponibilidad de la central (duración anual de operación)*

Existen pocos datos fiables e independientes sobre costes de energía; en un estudio a efectos comparativos se pueden proponer los siguientes precios de kWh, a un tipo de interés del 8% y precios de 1990:

OWC Duck y NEL, 0,20 €/kW
OWC Bristol, 0,15 €/kW
OWC Kvaerner, 0,1 €/kW y en oleaje de 15 €/kW.m
El Tapchan con olas de 17 kW/m, estaría por debajo de 0,1 €/kW
OWCs entre 0,5÷1 MW, 0,75 €/kW, para potencias medias anuales del oleaje

Es preciso indicar que los costes de OWCs montados en la costa, dependen en gran medida de la morfología (obra civil); una solución económicamente interesante podría ser la incorporación de OWCs en rompeolas y el aprovechamiento de cavernas naturales para los OWC.

Valoración de los OWCs.- Se considera que el éxito de un OWC depende en gran medida de la energía del oleaje, y depende principalmente de cuatro criterios.

- *Utilización de tecnología convencional, que se considera ventajosa en el desarrollo de la energía del oleaje*
- *Estado de desarrollo, en el que sistemas de pequeña y mediana capacidad tienen, en general, un mayor grado de desarrollo, siendo los sistemas que tienen mayores posibilidades para aplicaciones a corto y medio plazo*
- *Probabilidad de generación a coste comparable con el de otras energías renovables, siendo la competitividad económica un fuerte argumento para la implantación de estas tecnologías*
- *Impacto medio ambiental, en el que determinados aspectos ecológicos favorecen su implantación*

Comparación.- Comparar los sistemas que aprovechan la energía de las olas es tarea difícil,

porque su estado de desarrollo es muy diverso. Las columnas oscilantes OWCs, Péndulos, Tapchans y boyas mecánicas se han ensayado en laboratorio y se han construido prototipos para trabajar en el mar; los Ducks, Sea Clams, Cilindros Bristol y Rafts, se han ensayado en el laboratorio, pero no existe ningún prototipo; el rompeolas sumergido se puede clasificar como una idea.

Los OWCs neumáticos han alcanzado un alto nivel de desarrollo; su funcionamiento se ha probado en varias plantas piloto, y es el OWC que más atracción produce entre los investigadores. La experiencia obtenida con OWCs neumáticos instalados en la costa, se podría transferir a instalaciones más potentes en alta mar; el coste del kWh de energía eléctrica generado por un OWC es un poco más caro que el generado en forma convencional.

De los OWCs mecánicos, prácticamente destinados a la conversión primaria, se dispone de poca información; la energía mecánica se puede utilizar para bombear agua, bien para desalación del agua de mar, o para su posterior empleo en una turbina. Para la generación directa de electricidad, parecen más adecuados los sistemas neumáticos.

Los Péndulos se están investigando en Japón; son sistemas aptos para su incorporación en rompeolas existentes o nuevos, siendo bastante cuestionable su supervivencia en temporales, como se ha demostrado con algunos prototipos.

El funcionamiento del Tapchan se ha comprobado, utilizando tecnología convencional; económicamente parece ser competitivo, aunque se encuentran dificultades en su comercialización. Su construcción está condicionada, más que en los sistemas, a una obra civil conveniente.

Las bombas mecánicas de pistón y de manguera están en pleno desarrollo; su funcionamiento se ha demostrado con prototipos en el mar; su utilidad puede estar relacionada con la desalación del agua del mar; para grandes aprovechamientos, habría que contar con cientos o miles de unidades. El Frog es una idea muy interesante, pero está poco desarrollada.

Los Ducks están pensados para grandes aprovechamientos; sus componentes necesitan todavía una investigación considerable, siendo los dispositivos más complejos y futuristas.

Para los Cilindros vale lo anteriormente dicho de los Ducks, aunque necesitarían menos investigación. Los Sea Clams y Rafts son grandes OWCs flotantes, en los que todavía hay que resolver problemas de anclaje; su aplicación no es inmediata. El rompeolas sumergido es una idea que se puede aplicar en estructuras existentes, siendo interesante para aprovechamientos pequeños.

Estado de la investigación.- En la mayoría de los OWCs hay todavía una serie de cuestiones comunes a investigar, como:

- Mejoras en los rendimientos de las turbinas neumáticas.

- Las fluctuaciones de potencia en muchos OWCs son inevitables, por lo que se hace problemática su integración en la red eléctrica.

- Mejoras en el rendimiento de los OWCs, mediante ensayos en condiciones reales, ó en laboratorio con olas aleatorias

- Mejora en los rendimientos de conversión hidráulica a alta presión, con el consiguiente desarrollo de los componentes

Aunque casi todos los OWCs necesitan todavía de una cierta investigación, algunos han alcanzado ya una relativa madurez comercial, como el Tapchan, los OWC neumáticos para misiones especiales como carga de baterías en boyas de navegación, el Delbuoy para desalación de agua, etc. OWCs mecánicos pequeños se han construido a nivel de prototipo, (Pelamis, Dragon,...), mientras OWCs para grandes aprovechamientos como los Ducks y Cilindros Bristol se podrán desarrollar a más largo plazo, ubicándolos en la costa o cerca de ella.

Otro factor a tener en cuenta es la sencillez de los componentes y la ausencia de partes móviles en contacto directo con el agua, como en el OWC neumático, con excepción de la turbina Bulbo o Kaplan, de diseño convencional, en el caso del Tapchan.

Previsiones para el futuro.- En Europa parece razonable prever para el año 2010 una contribución de la energía generada a partir del oleaje del orden de 1 TWh/a, que es menos del 1% del potencial técnicamente aprovechable. El ritmo anual de construcción de nuevas instalaciones podría ser del orden de 20 a 30 MW, para así llegar al año 2010 con una potencia instalada de unos 300 MW. Para lograr estos objetivos serían necesarios programas de apoyo a lo investigación que permitieran avanzar en los siguientes aspectos:

- Optimización de los dispositivos
- Métodos de diseño y construcción
- Desarrollo de sistemas eficientes de conversión de energía
- Desarrollo de modelos de estimación de energía.
- Supervivencia, sustitución y condiciones de servicio de los sistemas

Después de lo visto parecen tener futuro el Tapchan y los sistemas OWC de columna de agua oscilante. Suponiendo aportaciones medias de 10 kW/m, y capturando la energía correspondiente a una línea de costa del orden de 150 m, con un rendimiento del orden del 33%, se podrían obtener potencias del orden de 0,5 MW. La viabilidad de una instalación Tapchan está muy condicionada por la configuración natural del emplazamiento, donde las obras de adaptación del mismo deben mantenerse dentro de límites razonables, debido a las repercusiones negativas en el coste y en el medio ambiente. El sistema de columna de agua oscilante no depende tan estrechamente del emplazamiento, requiriendo únicamente profundidades mínimas de 10 m, aumentando mar adentro. Aunque las consideraciones económicas y ambientales determinan ampliamente su viabilidad, sería razonable llegar a instalar en Europa en el año 2010 del orden de 100 Tapchan (50 MW) y 500 sistemas de columna de agua oscilante (150 MW), cuestión que a estas alturas es imposible.