

III.- TÉCNICAS PARA APROVECHAR LA ENERGÍA DE LAS OLAS

Los convertidores OWCs son dispositivos que transforman la energía del oleaje en energía útil; tienen que ser capaces de resistir los embates del mar y de funcionar eficientemente para las amplias gamas de frecuencia y amplitud de las olas.

Los primeros testimonios sobre la utilización de la energía de las olas se encuentran en China, en donde en el siglo XIII empiezan a operar molinos por acción del oleaje. Al principio de este siglo, el francés Bouchaux-Pacei suministra electricidad a su casa en Royan, mediante un sistema neumático, parecido a las actuales columnas oscilantes. En esta misma época se prueban sistemas mecánicos en California, y en 1920 se ensaya un motor de péndulo en Japón. Desde 1921 el Instituto Oceanográfico de Mónaco, utiliza una bomba accionada por las olas para elevar agua a 60 m con una potencia de 400 W.

En 1958, se proyecta una central de 20 MW en la isla Mauricio, que no llegó a construirse, consistente en una rampa fija sobre un arrecife, a través de la cual subía el agua a un embalse situado a 3 m por encima del nivel del mar.

Los franceses construyeron en Argelia en los años cuarenta dos plantas piloto tipo con canal convergente. En 1975 se construye un sistema similar en Puerto Rico, con el fin de alimentar con agua un puerto deportivo.

Uno de los pioneros en el campo del aprovechamiento de la energía de las olas fue el japonés Yoshio Masuda, que empezó sus investigaciones en 1945 y ensayó en el mar, en 1947, el primer prototipo de un Raft; a partir de 1960 desarrolla un sistema neumático para la carga de baterías en boyas de navegación, con una turbina de aire de 60 W, de la que se vendieron más de 1200 unidades.

En los años 70 se construye en Japón una plataforma flotante, de 80 m de largo y 12 m de ancho, llamada Kaimei, que alberga 11 cámaras para ensayos de turbinas de aire.

La investigación a gran escala del aprovechamiento de la energía de las olas se inicia a partir de 1974 en varios centros del Reino Unido, estudiándose sofisticados sistemas para grandes aprovechamientos, actividad que se abandona casi totalmente en 1982, por falta de recursos económicos. A mediados de los ochenta entran en servicio varias plantas piloto de distintos tipos en Europa y Japón.

III.1.- GENERADORES DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE OWCs

Pocas son las instalaciones que se han ensayado en el mar a escala natural, por lo que falta experiencia operativa con prototipos. En general, a medida que aumenta la distancia a la costa la densidad

de energía es mayor, pero la supervivencia está más comprometida y existe una mayor complicación para el transporte de la energía generada, por lo que hay que encontrar un compromiso entre la supervivencia del 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, realizándose el aprovechamiento de la energía de las olas en base a algunas de las siguientes metodologías:

CONVERSIÓN PRIMARIA.- Consiste en la extracción de la energía de las olas mediante sistemas mecánicos o neumáticos, convirtiendo el movimiento de las olas (oleaje), en el movimiento de un cuerpo o en un flujo de aire. La energía del oleaje se puede aprovechar para mover flotadores en sentido vertical y en rotación.

En aguas poco profundas se pueden aprovechar los movimientos horizontales del oleaje mediante flotadores o estructuras fijas. La energía de la ondulación del movimiento de las partículas del agua de una ola, se puede extraer mediante dispositivos tipo noria.

La oscilación del agua a causa del oleaje, dentro de una estructura semisumergida, se puede aprovechar por medios mecánicos o neumáticos, así como la variación de la presión causada por el oleaje, por debajo de la superficie del agua.

En resonadores flotantes, como las boyas de navegación, se pueden combinar los efectos de resonancia en el tubo, con el movimiento vertical del flotador, dando como resultado un rendimiento energético mucho mas favorable.

En dispositivos fijos, que tienen una abertura inferior en el tubo, orientada en la dirección de propagación de la ola, la energía que se aprovecha, utilizando la presión total de la ola, es aproximadamente el doble que en el caso anterior, en el que sólo se aprovechaba la presión estática.

CONVERSIÓN SECUNDARIA.- Consiste en la conversión de movimientos mecánicos o neumáticos en energía utilizable, generalmente electricidad. Los medios utilizados para ello son turbinas neumáticas e hidráulicas, dispositivos de transmisión mecánica, y de inducción magnética; a veces, el sistema se diseña exclusivamente para la desalinización del agua.

III.2.- CARACTERÍSTICAS DE LOS OWCs

Las características de los OWCs se pueden valorar según los siguientes criterios:

- a) **Por su posición relativa a la costa:** OWCs en la costa, cerca del litoral o en altamar.
- b) **Por su capacidad de producción energética,** relacionada con el punto anterior; pueden ser grandes, medianos o pequeños aprovechamientos.
- c) **Por su posición relativa a la dirección del oleaje,** destacando:
 - Totalizadores o terminadores:* OWCs largos con eje paralelo al frente del oleaje.
 - Atenuadores:* OWCs largos con eje perpendicular al frente del oleaje.
 - Absorbedores puntuales:* OWCs aislados de dimensiones reducidas, que aprovechan el efecto antena (concentración y convergencia del oleaje).
- d) **Por su posición relativa al agua:** OWCs fijos o flotantes, semisumergidos o sumergidos.
- e) **Según otros criterios,** teniendo en cuenta la simetría del OWC, la capacidad de almacenamiento de energía, la capacidad de control, la supervivencia en tormentas, el impacto medio ambiental, la complejidad de la tecnología, materiales, eficiencia, mantenimiento, posibilidad de construcción modular, etc.

La investigación actual de los OWCs está basada en los siguientes sistemas: Columna oscilante, Péndulo, Tapchan, Boyas mecánicas, Duck, Sea Clam, Cilindro Bristol, Raft, Rompeolas sumergido, etc.

TÉCNICAS DE UTILIZACIÓN ENERGÉTICA DEL OLEAJE.- Las técnicas de utilización energética del oleaje aprovechan estos fenómenos básicos que se producen en las olas, y son:

a) **Empuje de la ola.-** En aguas poco profundas la velocidad horizontal de las olas no varía con la profundidad; la energía de las olas se puede absorber mediante un obstáculo que transmite la energía a un pistón; es un sistema poco usado, Fig III.1.

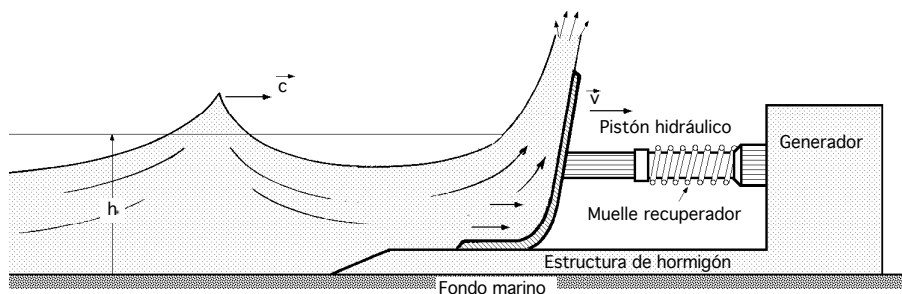


Fig III.1.- Aprovechamiento del empuje de la ola

b) **Variación de la altura de la superficie de la ola.-** Situando estructuras flotantes que se mueven con las olas, sintonizadas de manera que puedan captar su energía. Se dispone de un gran número de los mismos para capturar la energía, de forma similar a la de un receptor de ondas de radio, ya que se basan en que cualquier proceso que pueda generar olas, también sirve para extraer su energía, Fig III.2. Su pequeño tamaño resulta ventajoso y permite su fabricación en serie. La mayoría de estos aparatos utilizan el efecto de bombeo que proporciona un flotador. Sus inconvenientes derivan principalmente de la fiabilidad de los caudales y de la interconexión eléctrica. Se les puede considerar aparatos de segunda generación.

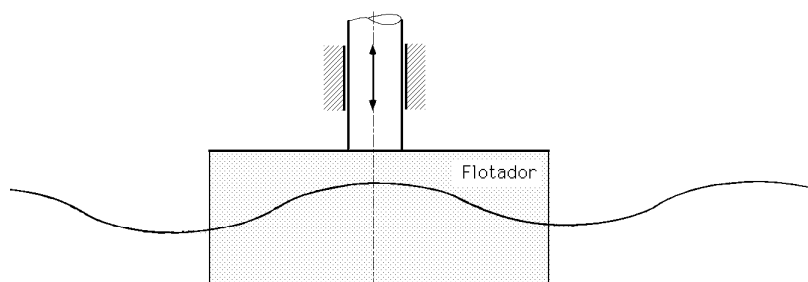


Fig III.2.- Aprovechamiento de la variación de la altura de la superficie de la ola

c) **Variación de la presión bajo la superficie de la ola.-** Son los sistemas de columna de agua oscilante; consisten en una cámara abierta al mar, que encierra un volumen de aire que se comprime y expande por la oscilación del agua inducida por el oleaje, Fig III.3; el aire circula través de una turbina que puede ser bidireccional. Se les puede considerar aparatos de primera generación.

Los sistemas activos son aquellos en los que los elementos del dispositivo, al moverse a impulsos del oleaje, generan energía aprovechando el movimiento relativo entre sus partes fijas y móviles.

Los sistemas pasivos son aquellos en los que la estructura permanece inmóvil, generándose energía directamente, a partir del propio movimiento de las partículas de agua.

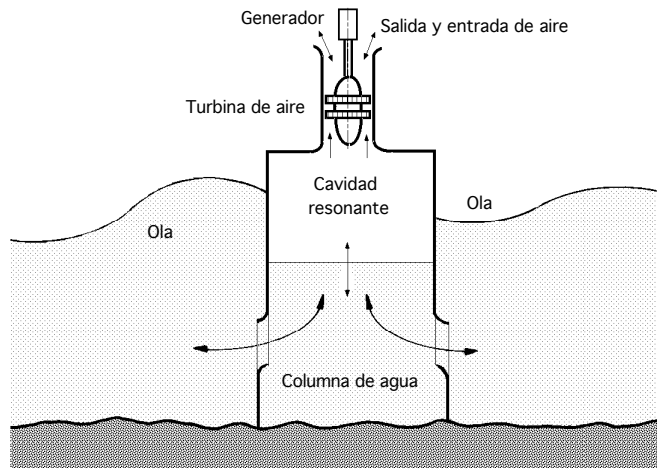


Fig III.3.- Cavity o columna resonante

III.2.- TOTALIZADORES O TERMINADORES

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

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. 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, Fig III.4.

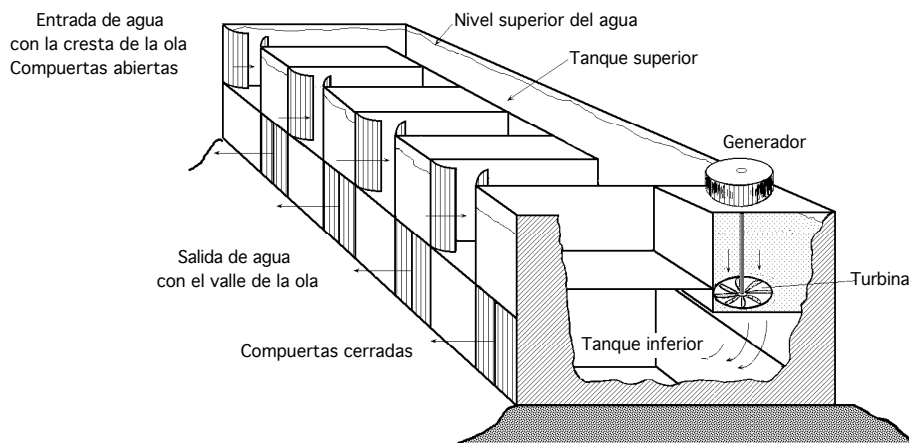


Fig III.4.- OWC Rectificador Russel

OWCs MECÁNICOS.- 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 alternador, Fig III.5.

OWC DE UNIÓN FENOSA.- Es un sistema de conversión primaria y secundaria por medios mecánicos, desarrollado e instalado por la empresa Unión Fenosa en la Central Térmica de Sabón (La Coruña), aprovechando la instalación hidráulica del sistema de refrigeración de uno de los condensadores de la central térmica. El OWC ubicado en el pozo existente, comunica con el mar, y consta de un flotador de

6 m 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 a un generador eléctrico, con volante de inercia, Fig III.6.

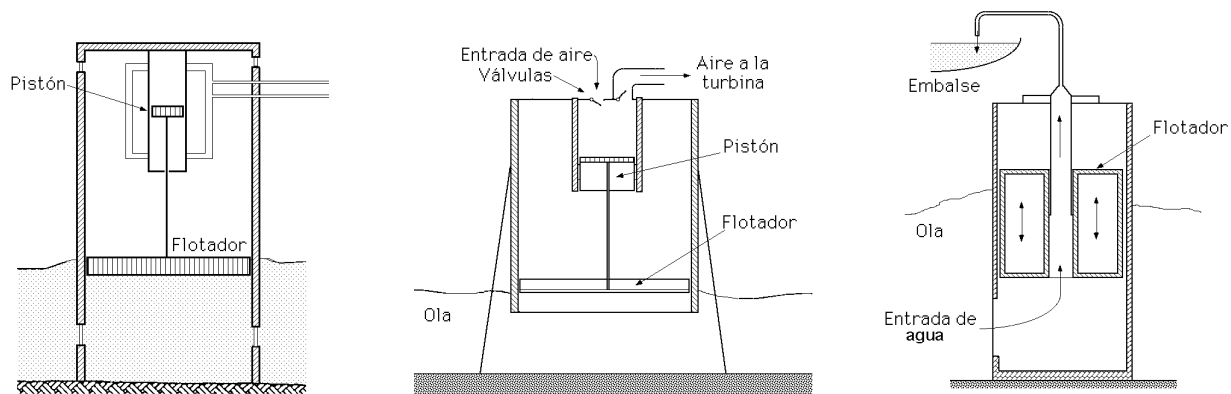


Fig III.5.- OWCs mecánicos para bombeo de aceite, aire y agua, respectivamente

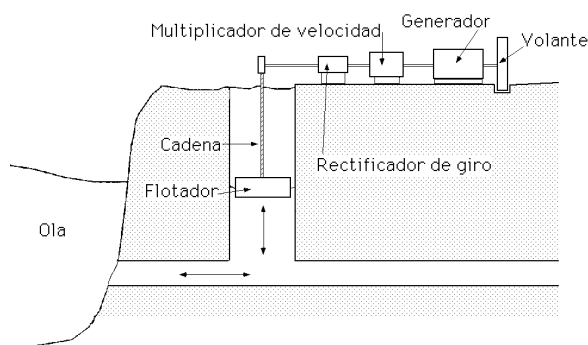


Fig III.6.- OWC Mecánico de Unión Fenosa

OWC PÉNDULO.- El péndulo es un dispositivo apto para ser instalado en un rompeolas. 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, Fig III.7. En el interior de la cámara, de una profundidad del orden de un cuarto de longitud de ola, se produce una ondulación estacionaria que mueve la placa, cuyas oscilaciones se transmiten y absorben por un dispositivo oleohidráulico, estimándose la eficiencia primaria de éste dispositivo (olas-aceite) en un promedio del 35%, y la eficiencia total en un 20%; para olas regulares, de período igual al período natural del péndulo la eficiencia puede llegar al 100%. En la planta piloto de Muroran (Japón) se han observado eficiencias del orden del 50%. Las características de esta planta piloto son:

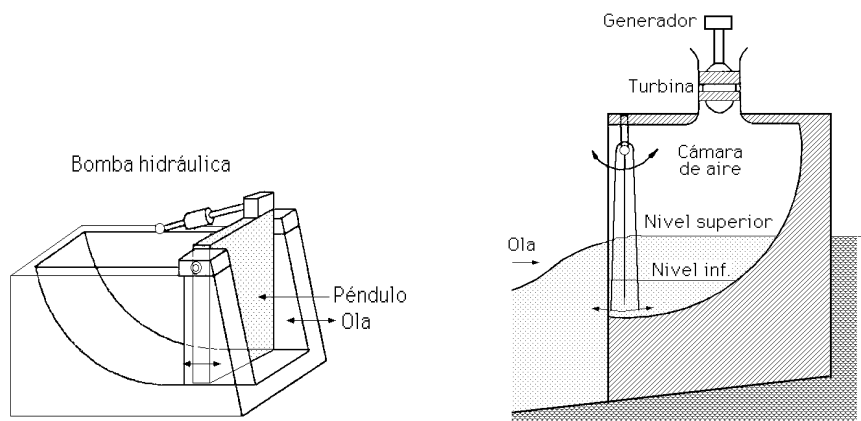


Fig III.7.- Péndulos OWC

Cajón de altura: $h = 8 \text{ m}$, con 2 cámaras

Cámara: anchura = 2,3 m; longitud = 7,5 m

Péndulo: altura $h = 7,4 \text{ m}$; anchura $b = 2,0 \text{ m}$; oscilación de funcionamiento $\alpha = 14^\circ$; oscilac. maximal $\alpha = 30^\circ$.

Potencia: $N = 5 \text{ kW}$, para alturas de ola de $H_s = 1,5 \text{ m}$ y período $T_s = 4 \text{ seg}$

Potencia máxima: $N = 15 \text{ kW}$

Una variante del Péndulo es el Flap, sistema que consta de un cajón y una placa vertical, articulada en su extremo superior, que permite un ligero giro de la placa. El eje de la articulación está conectado a un motor hidráulico que acciona un generador. Las dimensiones de la cámara son: anchura = 5 m; longitud = 6,15 m; altura = 4,6 m

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 mar, Fig III.8, convirtiendo la mayor parte de la energía de las olas en energía potencial, para su posterior restitución al mar a través de una turbina convencional tipo Kaplan.

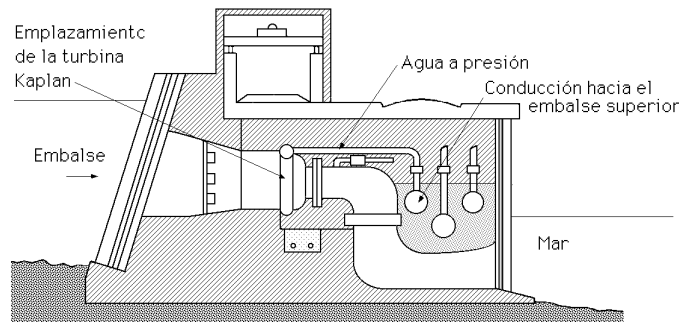


Fig III.8.- Instalación de turbobomba para Chapman

El prototipo de 400 kW con un desnivel de 4 m por encima del nivel medio del mar; está instalado en Toftestallen, Noruega, funcionando satisfactoriamente. La capacidad del embalse es de 8500 m³ y alimenta una turbina Kaplan de 0,35 MW. La longitud total del canal es de 170 m. La forma de la embocadura se ha conseguido mediante voladura de la roca existente, y la parte estrecha, que corresponde a la mitad de la longitud total, se ha construido de hormigón. Ha funcionado durante 6 años, habiendo sido sometida a posteriores reparaciones.

En Java (Indonesia), se está desarrollando actualmente un proyecto de 1,1 MW de las siguientes características:

Superficie del embalse: 7000 m²

Salto máximo: 4 m

Colector: ancho 124 m; longitud 126 m

Convertidor: anchura máxima 7 m; longitud 60 m

Energía anual: 6,1 GWh

Para una potencia media anual del oleaje de 17 kW/m, la energía anual de incidencia es:

$$124 \text{ m} \times 17 \text{ kW/m} \times 8760 \text{ h} = 18,5 \text{ GWh}$$

La eficiencia global anual se estima en un 33%. La potencia N de un aprovechamiento hidroeléctrico del agua almacenada con un salto H y un caudal Q es: $N \text{ (kW)} = 8 Q \text{ (m}^3/\text{seg)} \times H \text{ (m)}$

Para una potencia nominal de 1100 kW el caudal sería:
$$\begin{cases} Q = 34 \text{ m}^3/\text{seg para un salto } H = 4 \text{ m} \\ Q = 46 \text{ m}^3/\text{seg para un salto } H = 3 \text{ m} \end{cases}$$

Suponiendo se admite una variación en el salto de 1 metro, el embalse garantiza la generación eléctrica a potencia nominal durante tres minutos, sin que haya aportaciones al embalse.

Para el almacenamiento de la energía durante períodos mayores sería necesario un embalse más amplio, u otro adicional a mayor altura, utilizando una turbobomba en vez de una turbina hidráulica convencional. En King Island (estrecho de Bass, Australia), está prevista la construcción de un prototipo de 1 MW.

III.3.- SISTEMAS DE BOMBEO

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, Fig III.9.

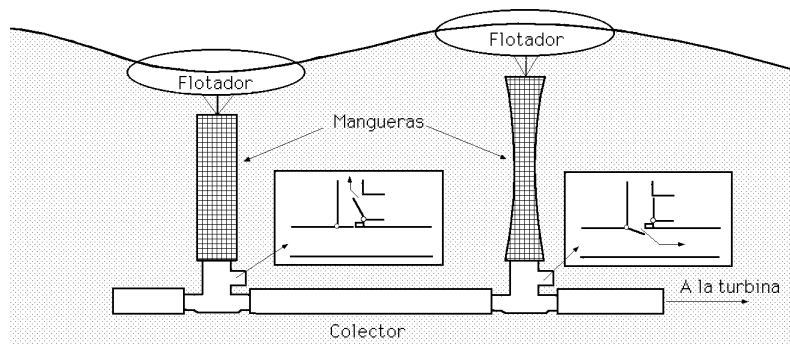


Fig III.9.- Bomba de mangueras

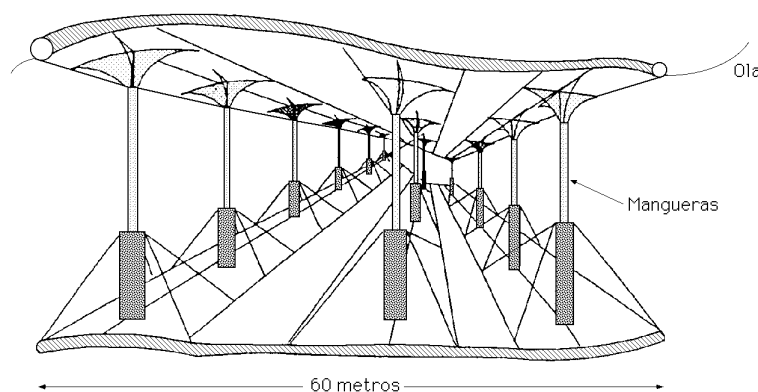


Fig III.10.- Sistema de mangueras Lilypad

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.

El sistema Lilypad, Fig III.10, es un dispositivo flotante de grandes dimensiones, que utiliza un sistema de mangueras en serie, conectadas en sus extremos a membranas deformables, unas flotantes o ligeramente sumergidas, y otras sumergidas fuera de la influencia del oleaje.

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 kilómetros de la costa de Hanstholm, Dinamarca, que fue destruido por un temporal; tenía una base cilíndrica de hormigón armado de 9 m de diámetro, y estaba anclado a 30 m de profundidad.

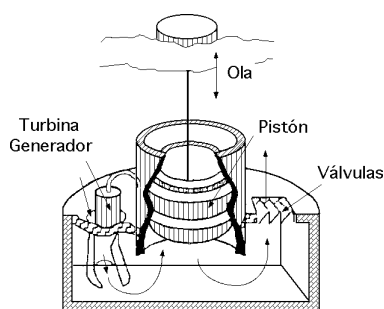


Fig III.11.- Bomba de pistón de Hanstholm

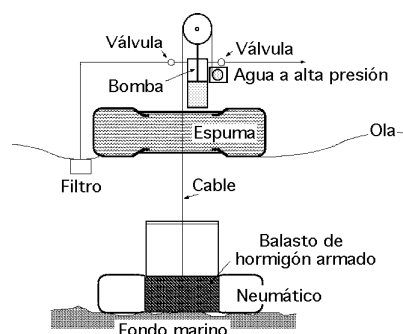


Fig III.12.- Bomba de pistón montada sobre boya

El cuerpo flotante, también de hormigón, de 6 m 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 45 kW, se enviaba a la costa a través de un cable. Una central ficticia de bombas de pistón, constituida por 2640 flotadores de 10 m de diámetro, 100 Tm de peso, con un pistón de 55 Tm, y una estructura de hormigón en el fondo de 3000 Tm, generaría 350 MW.

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

En otros sistemas, la bomba de pistón está montada sobre la boya; tanto la boya como la plataforma de anclaje, están construidas con neumáticos usados de diámetro = 2,5 m, Fig III.12.

III.4.- SISTEMAS HIDRÁULICOS

OWC FROG.- Este sistema consta de un flotador en forma de remo en posición vertical, conectado rígidamente a un casco sumergido y anclado al fondo del mar, como una boya, Fig III.13.

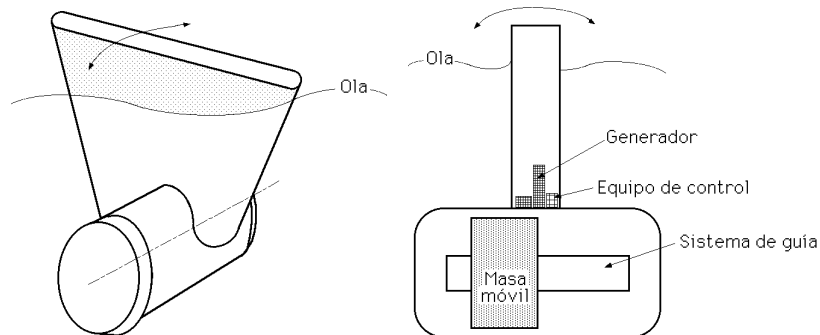


Fig III.13.- Sistema Frog

El casco contiene una masa, que actúa como pistón dentro de un cilindro, que puede moverse sobre un eje en la dirección de las olas, produciéndose un flujo de aceite a alta presión, para su utilización como fluido en una turbina hidráulica. El casco, metálico, tiene 23 m de altura y pesa 1.625 Tm, de las que 1.250 Tm corresponden a la masa de reacción. El Frog, actualmente poco desarrollado, se caracteriza por una alta eficiencia en conversión primaria, hecho comprobado en pruebas con olas regulares.

OWC DUCK o PATO SALTER.- Se puede considerar como un totalizador activo para el aprovechamiento de las olas a gran escala en altamar, Fig III.14; 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.

Básicamente consiste en una estructura flotante, tal como se indica en la Fig III.14; 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.

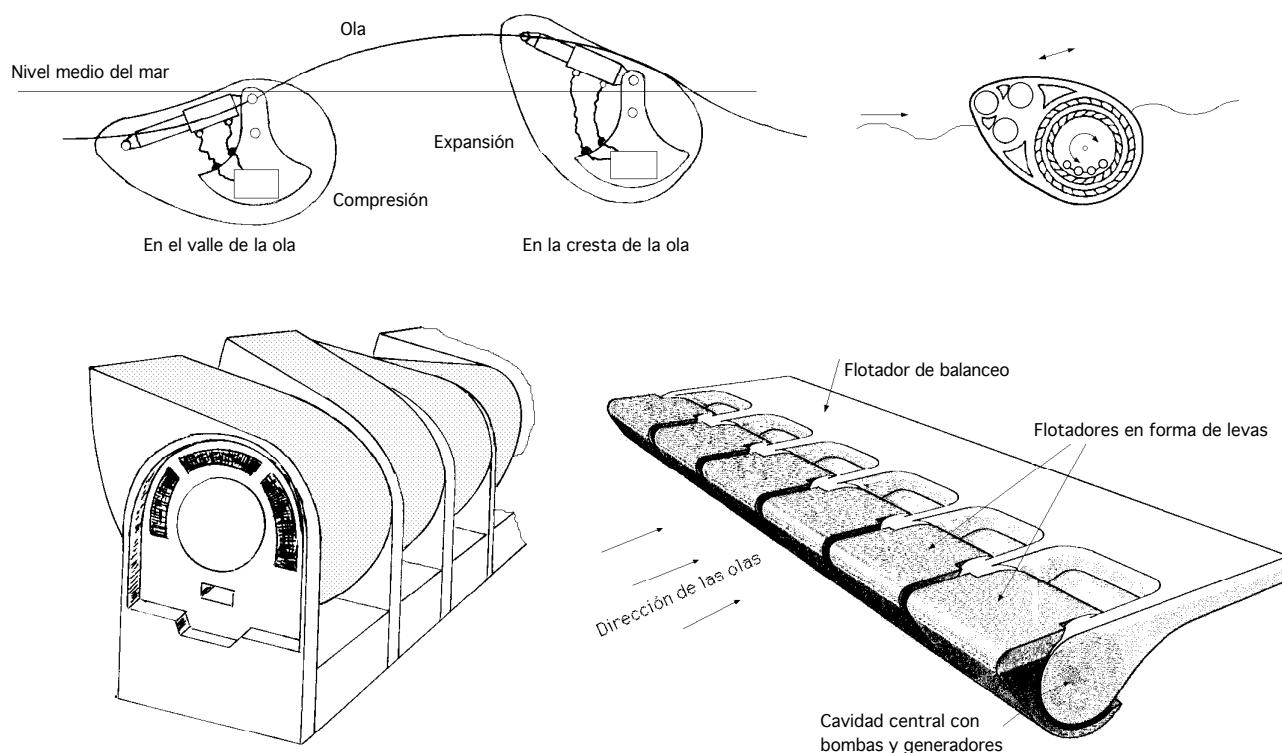


Fig III.14.- Diversos esquemas de pato Salter

El módulo de una supuesta central podría estar formado por 54 cilindros flotantes de hormigón, de 14 m de diámetro y 90 m de longitud, de 11.000 toneladas de peso cada uno, anclados a 100 m de profundidad. Sobre cada uno de los cilindros vienen montados dos cascos, los ducks, que pueden rotar alrededor de los cilindros en respuesta a las olas.

Una planta de 2 GW estaría conformada por 8 módulos con un total de 864 Ducks, y una longitud de 38,9 km; cada Duck estaría provisto, en su interior, del equipo mecánico y eléctrico propio para la generación de electricidad. La conversión secundaria se realizaría por un sistema hidráulico de aceite.

Una de las características del Duck sería una alta eficiencia en la conversión primaria, alcanzando casi el 100% en condiciones óptimas. Gran parte de la tecnología de conversión es nueva y necesita investigarse aún mucho más; su aplicación real queda para un futuro lejano.

OWC CLAM.- El Clam es una estructura flotante de forma toroidal de 60 m de diámetro y 8 m de altura, Fig III.15. La estructura base de acero u hormigón, lleva montadas sobre la cara exterior 12 células de aire, formadas por membranas de goma reforzada, de 15 m de ancho y 7,5 m de alto.

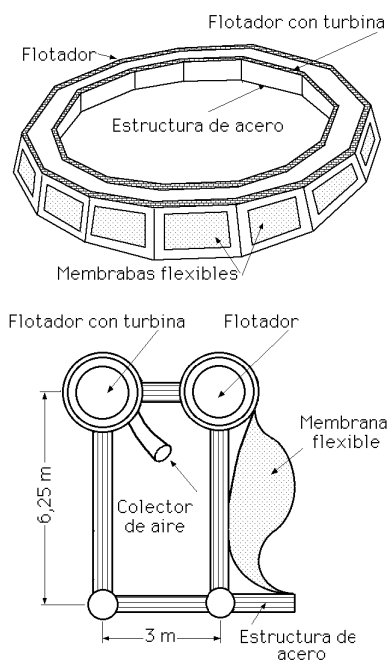


Fig III.15.- Sistema Clam

Las membranas son deformables por la acción del oleaje. Tres cuartas partes aproximadamente de las membranas están sumergidas. El interior de las membranas contiene aire a una presión 15 kPa.

Una planta compuesta de 5 unidades, proporcionaría un total de 12,5 MW.

Cuando una ola choca con la membrana, su volumen disminuye y hace circular el aire dentro de ella, a través de una tubería, hacia las otras membranas. Cada unidad contiene 10 turbinas tipo Wells de 250 kW. La disposición circular de las membranas tiene la ventaja de que el oleaje se puede aprovechar desde cualquier dirección.

OWC CILINDRO BRISTOL.- El Cilindro, desarrollado por la universidad de Bristol, es otro concepto para grandes aprovechamientos.

Una planta que funcionase con este sistema constaría de 276 módulos o cilindros; cada cilindro mediría 100 m de longitud y 16 m de diámetro; su parte superior estaría situada a 6 m de la superficie del agua, y anclada a 40 m de profundidad, por lo que el cilindro totalmente sumergido, no tiene su estructura sometida a fuerzas excesivas durante las tormentas, Fig III.16.

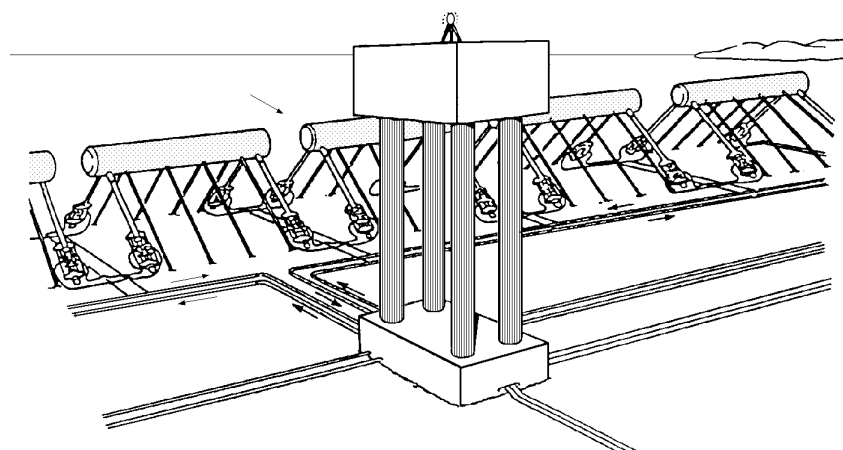
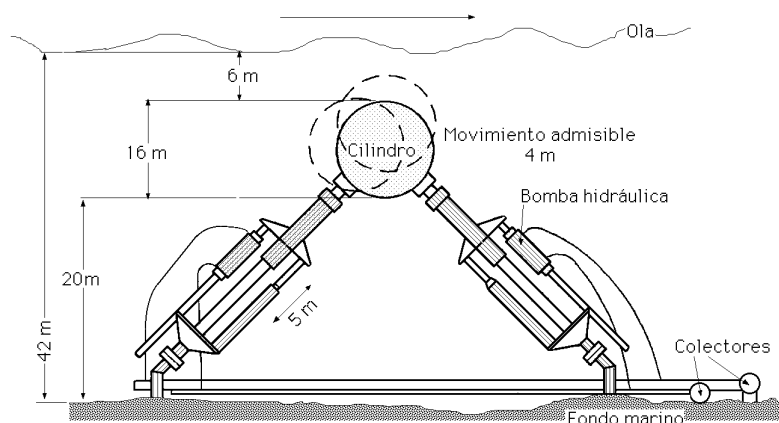


Fig III.16.- Cilindro Bristol

En la estructura de anclaje están incorporadas bombas hidráulicas, que permiten un desplazamiento vertical. Expuesto al oleaje, el cilindro describe un movimiento circular, en respuesta al movimiento orbital de las partículas de agua dentro de la ola.

El medio de bombeo, agua del mar, sería transportado por tuberías de 1,2 m a seis plataformas por encima del nivel del mar, cada una equipada con tres turbinas Pelton de 120 MW.

La potencia nominal de la instalación sería 2 GW, habiéndose demostrado que la extracción podría alcanzar el 100% con una adecuada combinación de movimientos.

OWC RAFT o Balsa Cockerell.- Los Rafts son gigantescas plataformas flotantes, articuladas entre sí, (dos o más), unidas mediante mecanismos hidráulicos (cilindro-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 un fluido mediante el sistema (cilindro-émbolo) citado, colocado en las articulaciones que une los flotadores (movimiento alternativo), Fig III.17, accionando el fluido a presión resultante una turbina.

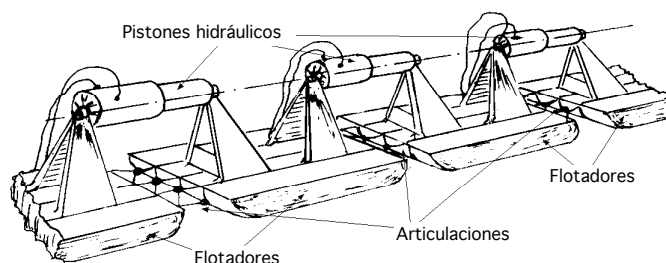


Fig III.17.- Balsa Cockerell

Las balsas ascienden y descienden impulsando un fluido hasta un motor que mueve un generador por medio de un sistema hidráulico instalado en cada articulación.

El número óptimo de flotadores es de 3 y el tamaño óptimo del sistema es de 100 m x 50 m, para conseguir potencias de 1 a 2,5 MW.

El oleaje produciría una rotación en las articulaciones que se podría aprovechar para accionar bombas hidráulicas. Su eficiencia teórica puede alcanzar el 90%. En ensayos con prototipos se han encontrado eficiencias del orden del 40% al 50%. Dadas sus gigantescas dimensiones, y las inmensas fuerzas que actúan sobre el anclaje, hacen que el sistema Raft no resulte competitivo.

OWC ROMPEOLAS SUMERGIDO.- Se han propuesto rompeolas sumergidos, Fig III.18, 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.

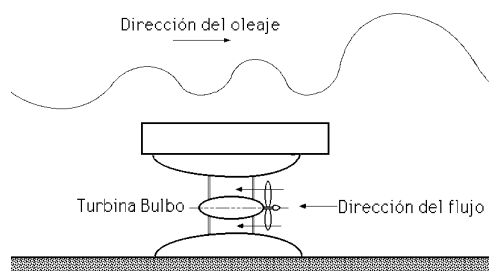


Fig III.18.- Rompeolas sumergido con turbina Bulbo

III.5.- OWC COLUMNA OSCILANTE

El principio de extracción de la energía de las olas está basado en la oscilación del agua dentro de una cámara semisumergida y abierta por debajo del nivel del mar, provocada por el oleaje, que produce un cambio de presión del aire por encima el agua, obteniéndose un flujo de aire que se puede aprovechar haciéndole pasar a través de una turbina.

En algún caso, se aprovecha la oscilación del agua mediante un flotador. La conversión secundaria se efectúa en este caso, por medios mecánicos o hidráulicos.

Existen varios prototipos de OWCs neumáticos, algunos de ellos a escala real, siendo el único OWC que se ha comercializado con éxito para suministrar electricidad a los sistemas de iluminación de boyas de navegación. Su popularidad se debe a su aparente simplicidad por cuanto convierte las velocidades bajas y fuerzas altas del oleaje, en un flujo de aire de alta velocidad y baja fuerza, aptos para la alimentación de un generador eléctrico.

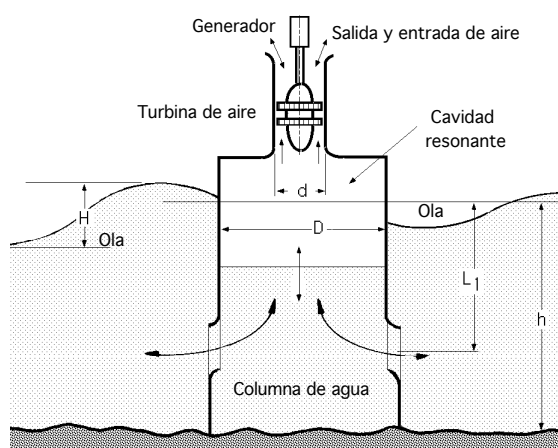


Fig III.19.- Esquema de funcionamiento de un OWC neumático anclado al fondo

La conversión primaria tiene lugar en una cámara fija o flotante, normalmente sin piezas móviles; su funcionamiento está basado en la resonancia, es decir, en la amplificación de la oscilación del agua que es máxima cuando la frecuencia natural del OWC coincide con la frecuencia de la ola. En el funcionamiento de un OWC neumático, la columna de agua dentro de un tubo fijo está en resonancia con una ola de frecuencia:

$$f = \frac{w_c}{2\pi} = \frac{1}{T_c} + \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L + L^*}}$$

siendo L la longitud de la columna, y L^* la longitud debida a la masa adicional

En estado de resonancia, el agua oscila dentro de la columna con una amplitud $\frac{H^*}{2} > \frac{H}{2}$, siendo H la altura de la ola, Fig III.19. Como la columna de agua actúa como un pistón, origina la oscilación del aire situado por encima del nivel del agua.

El desplazamiento medio del agua en la columna (y en consecuencia del aire), su velocidad y aceleración son, respectivamente:

$$\text{Desplazamiento: } y = \frac{H^*}{2} \cos(w t)$$

$$\text{Velocidad: } v = \frac{dy}{dt} = - \frac{w H^*}{2} \sin(w t)$$

Aceleración: $\frac{d^2 y}{dt^2} = -w^2 y$

y teniendo en cuenta la ecuación de continuidad, y suponiendo que el aire es incompresible, la velocidad v_a en la abertura es:

$$v_a = \frac{v_c \Omega_c}{\Omega_a}$$

siendo Ω_c y Ω_a las áreas de la columna y de la abertura.

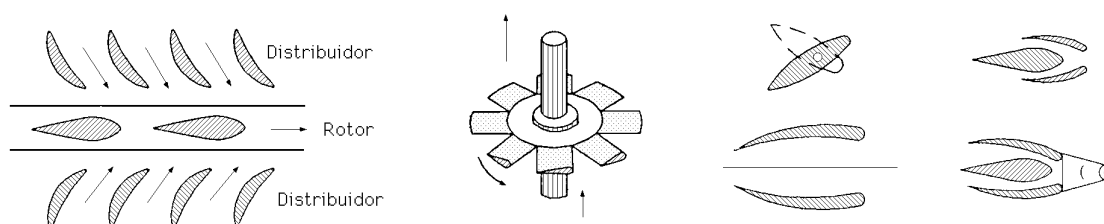
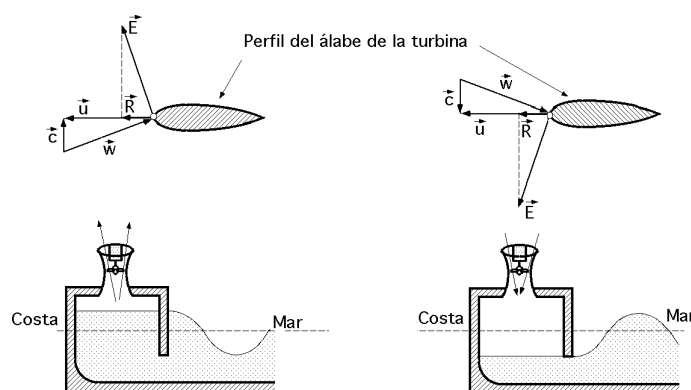


Fig III.20.- Turbina Wells

La energía cinética del aire expulsado de la columna se puede aprovechar situando una turbina neumática en la abertura. El flujo de aire producido dentro de la cámara, aparte de su irregularidad, es bidireccional, de acuerdo con la oscilación del agua.

En los primeros intentos para generar una rotación mecánica unidireccional, con el objeto de acoplar un alternador, se ha utilizado un sistema de válvulas rectificadoras y turbinas convencionales, siendo la más utilizada la turbina Francis.

Una variante de la turbina Francis se puede utilizar como turbina neumática, con las mismas características hidráulicas: banda ancha de funcionamiento y alta eficiencia; su punto débil radica en que hay que rectificar previamente el flujo y en que el buen funcionamiento de las válvulas resulta problemático, por lo que el empleo de turbinas convencionales y válvulas, ha quedado casi abandonado con la aparición y desarrollo de turbinas autorectificadoras.



c es la velocidad de salida del aire, w es la velocidad relativa del aire
 u es la velocidad periférica de la turbina
 E es el empuje aerodinámico, y R es la resultante, igual en las dos situaciones
 Fig III.21.- Principio del funcionamiento del OWC de columna oscilante

Estas turbinas mantienen el sentido del giro, con independencia de la dirección del flujo. La turbina de estas características más difundida, es la turbina Wells, axial, Fig III.20, desarrollada en la Universidad de Belfast a partir de 1976; en su forma más simple consta de un rotor con 3 a 5 palas fijas y simétricas, colocadas radialmente; su eficiencia es menor que la Francis y su rotación a alta velocidad produce

mucho ruido; variantes de ella son la turbina biplana y la turbina de contrarotación.

Otra turbina autorectificadora es la turbina de McCormick, Fig III.22, que es una turbina radial de acción, formada por dos rotores que giran en sentidos opuestos, y dos distribuidores; otras variantes de la turbina de McCormick son la de Babinsten, Fig III.23, con un rotor y dos distribuidores y la de Filipenco, Fig V.24, con tres rotores y dos distribuidores.

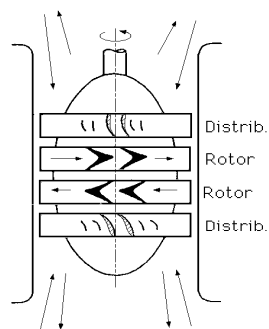


Fig III.22.- Turbina McCormick

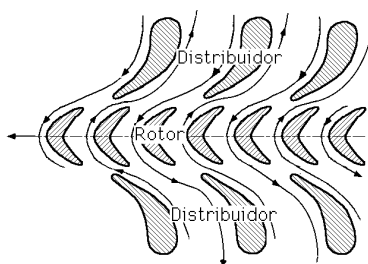


Fig III.23.- Turbina Babinsten

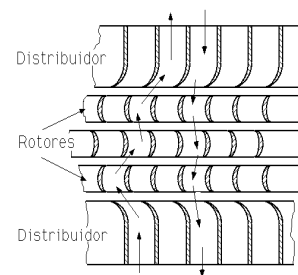


Fig III.24.- Turbina de Filipenco

Otras mejoras en la regulación del flujo y fuerzas axiales sobre el alternador, consisten en utilizar una turbina radial con un rotor de álabes simétricos, colocados tangencialmente en la dirección del flujo,

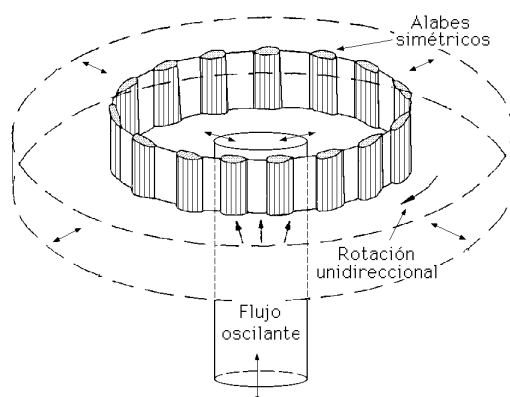


Fig III.25.- Turbina radial con rotor de álabes simétricos

Fig III.25. En general, las turbinas radiales son más eficientes, pero más complicadas en su diseño; su velocidad es menor. Debido a la gran variabilidad del flujo, una turbina tiene que estar provista preferiblemente de un dispositivo de regulación que mantenga una eficiencia aceptable sobre una banda de funcionamiento suficientemente ancha, eficiencia que se puede obtener utilizando palas de ángulo de ataque variable, con los consabidos problemas de diseño y funcionamiento.

Una opción sencilla sería el controlar la velocidad de la turbina mediante la alteración del área del flujo,

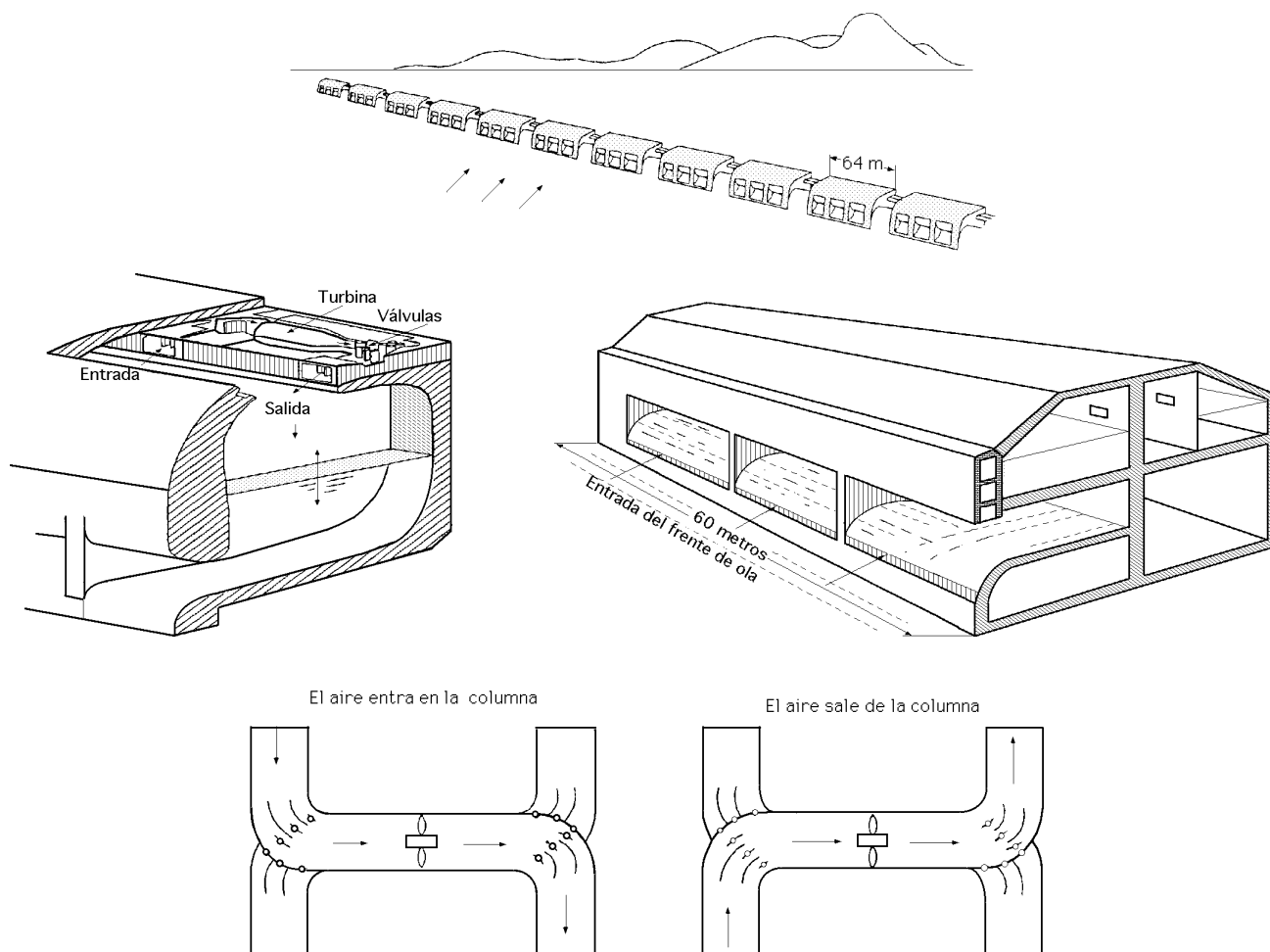
o la colocación de un distribuidor de álabes variables.

La eficiencia de los OWCs neumáticos, y de algunos otros sistemas, depende de la frecuencia de la ola incidente, habiéndose comprobado puede llegar a ser casi del 100%. La eficiencia en la conversión primaria, sin control, puede ser del orden del 30%, y del 82% con control. La eficiencia de extracción de la energía del oleaje y su conversión en electricidad, es uno de los factores clave que influyen en la economía del sistema, siendo su eficiencia del orden del 25% al 50%.

En las turbinas Francis la eficiencia máxima es del orden del 85%, en las McCormick del 75% y en las Wells del 70%; considerando que los costes de la turbina y del generador de un OWC fijo son normalmente el 20% de los costes totales, un incremento de la eficiencia media anual de la turbina del 60% al 70%, implicaría un aumento del orden del 80% de los costes del generador y de la turbina.

III.6.- PROYECTOS Y PROTOTIPOS DE OWCs NEUMÁTICOS

OWC NEL.- El National Engineering Laboratory NEL, se proyectó utilizando tecnología y equipos convencionales; se pretendía ubicarle en aguas poco profundas para evitar el impacto de temporales fuertes, a costa de reducir la disponibilidad del oleaje.



Sistema de válvulas del N.E.L.(4 grupos)

Fig III.26.- Convertidor N.E.L.

Funciona según el principio de la cavidad resonante de forma que mediante un sistema de válvulas se consigue que el aire que atraviesa la turbina circule siempre en el mismo sentido.

En la Fig III.26 se presentan vistas de detalle, general y panorámica, del convertidor N.E.L. que consiste en una estructura de hormigón prefabricado, parcialmente sumergido, abierto al mar por debajo de la superficie del agua; el aire encerrado y comprimido en la estructura accionaría una serie de turbinas que tendrían una potencia de 2 GW y constaría de 606 módulos de 64 m de longitud cada uno, formando líneas continuas de barreras orientadas en la dirección principal del oleaje.

La estructura iría fijada en el fondo, a 21 m por debajo del nivel del mar, mediante un sistema de barras de anclaje. Cada módulo, de 22.500 toneladas, contendría tres OWCs de 15 m² cada uno. La longitud total de la instalación sería 38,8 Km. En el diseño original, el flujo de aire desde cada OWC se rectificaba mediante válvulas antes de pasar por una turbina axial. Más tarde esta turbina fue sustituida por una turbina Reflair, diseñada por Sulzer, que es una turbina autorectificadora, como la Wells, que no necesita válvulas (o una Francis).

Cada turbina accionaría un generador de 1,65 MW y los generadores irían interconectados después de rectificar la corriente continua, en alterna, que se transformaría a 11 kV; la corriente de un grupo de módulos se transformaría a 132 kV para su transmisión a la costa. En las Fig III.27 y 28 se presenta el esquema operativo del funcionamiento del prototipo de Islay (Escocia) 1987 de 75 kW, de 17 x 3 m, que aprovecha tanto la subida de las olas, como su bajada, mediante una válvula de cuatro pasos que distribuye y conduce el aire comprimido siempre en el mismo sentido, hacia la turbina de aire.

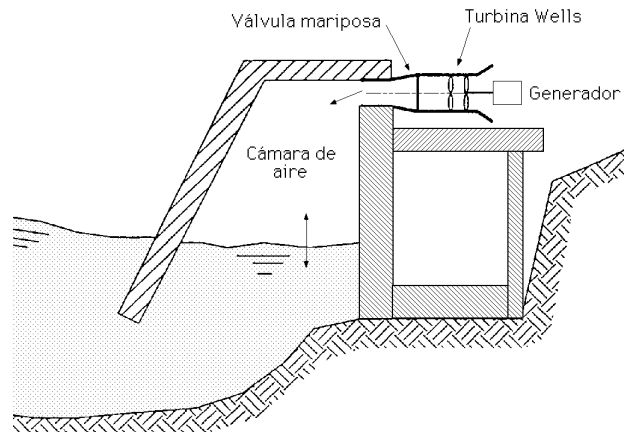


Fig III.27.- Esquemas operativos del N.E.L. de la isla de Islay

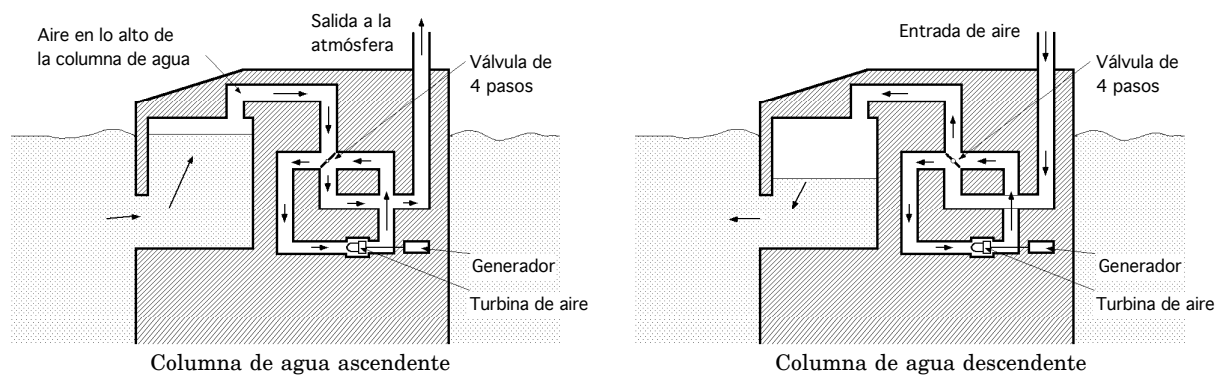


Fig III.28.- Esquema operativo N.E.L. de columna de agua oscilante

OWC SHORELINE o CONVERTIDOR BELFAST.- Este OWC, proyectado para ser ubicado en la costa, aprovecha las formas naturales del litoral; su desarrollo fue iniciado en la Queen's University de Belfast en 1985, Fig III.29. En el diseño se intenta concentrar el oleaje hacia la cámara; estructuralmente se basa en la simplicidad de los componentes, minimizando los costes de la obra civil, incorporando los acantilados como parte de la cámara de aire.

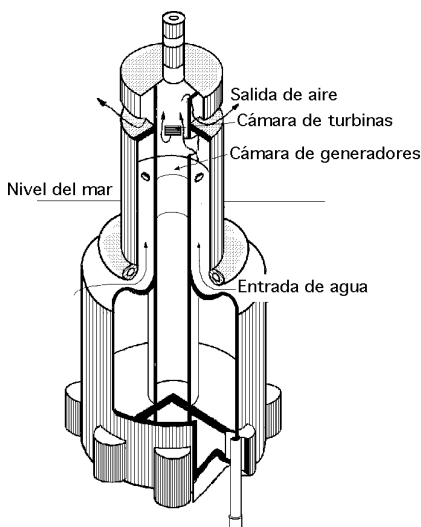


Fig III.29.- Convertidor Belfast

El principio de operación de este OWC es idéntico al del NEL, pues aprovecha el flujo de aire producido por la oscilación del agua dentro de la cámara. El aire de la cámara se conduce a través de un tubo de 1 m de diámetro hacia una turbina biplana tipo Wells, (que gira siempre en el mismo sentido independientemente de la corriente de aire), de potencia nominal 75 kW y velocidad nominal 1500 rpm. En 1987 se inició la construcción de un prototipo en la isla escocesa de Islay. La obra civil, se terminó en 1989, y se estudió y analizó la potencia hidroneumática dentro de la cámara de aire, proyectando sobre los resultados obtenidos el equipo mecánico y eléctrico, cuya instalación fue terminada en 1991. El alternador está acoplado directamente a la turbina, y genera electricidad a 440 V, que posteriormente se transforma a 11 kV, conectando la planta a la red (1993).

ART OSPREY.- El Art Osprey es un OWC de forma semiesférica de 20 de altura que contiene dos cámaras de aire, Fig III.30; colocado en el fondo del mar, a unos 18 m de profundidad, tiene su salida equipada con dos turbinas tipo Wells y generadores en posición vertical, de 0,5 MW de potencia cada grupo. La estructura de la cámara está formada por elementos metálicos, montados en la costa; su fijación al fondo del mar se efectuó por balasto de sedimentos y hormigón, en 1992.

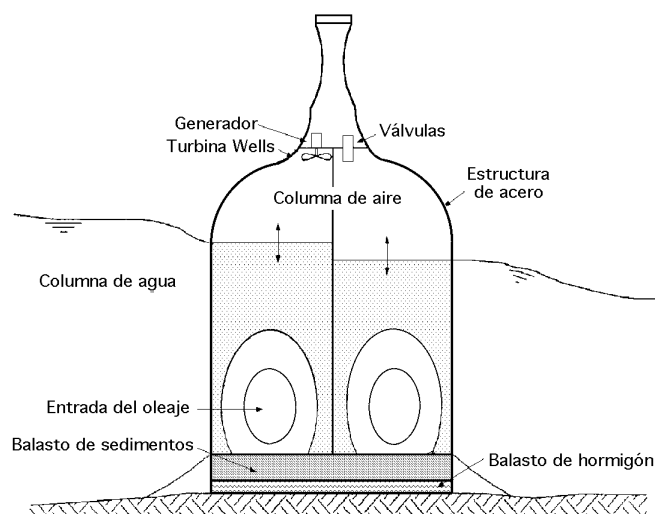


Fig III.30.- OWC Art Osprey

OWC KVAERNER (NORUEGA).- En 1985 se instaló un OWC de 500 kW en Toftestallen, Noruega; diseñado por la ingeniería Kvaerner, el dispositivo operó durante tres años satisfactoriamente, antes de que fuera destruido por un fuerte temporal. Fue construido en un acantilado vertical de 30 m, y consistía en una base de hormigón y un tubo metálico de 10 m de diámetro. En la parte superior del tubo se instaló un grupo en vertical con turbina tipo Wells, Fig III.31. Las olas penetraban por la parte inferior del cilindro y desplazan hacia arriba la columna de aire, lo que impulsa una turbina instalada en el extremo superior del tubo. Esta central abastecía a una aldea de 50 casas.

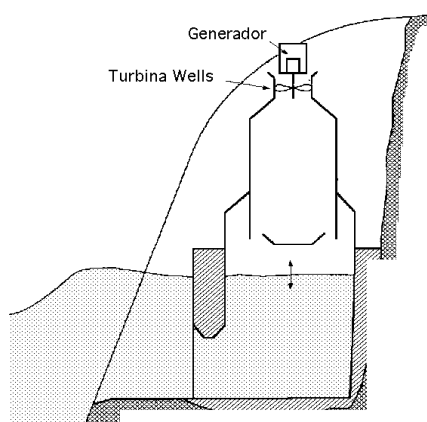


Fig III.31.- OWC Kvaerner

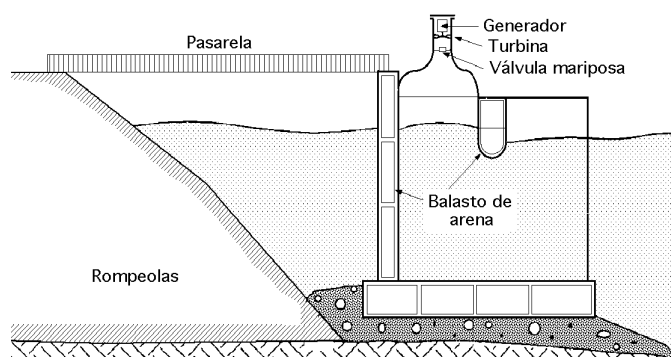


Fig III.32.- OWC de Madrás

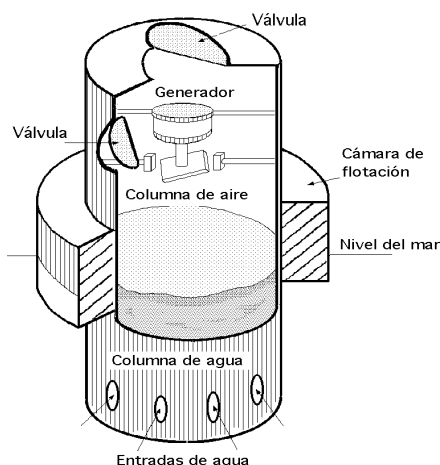


Fig III.33.- Boya Masuda

OWC de MADRAS (INDIA).- Este OWC se construyó en la costa de Kerala, cerca de Trivandrum, India, y genera 150 kW desde 1991, Fig III.32. La cámara es un cajón de hormigón de 3.000 Tm, fabricado en dique seco, y posteriormente anclado en la parte exterior de un rompeolas; las cámaras se llenaron con 3.000 Tm de arena; la estructura, de 6.000 Tm, soporta el impacto de olas de hasta 7 m; la turbina es de tipo Wells de eje vertical, con un rotor de 2 m de diámetro.

OWC SANZE o BOYA MASUDA (JAPON).- Es una boya que tiene en su interior un sistema que actúa por el principio de cavidad resonante, accionando una turbina de aire comprimido por la columna de agua provocada por las olas, Fig III.33. Es similar al

dispositivo de Islay, es el OWC de Sanze, Japón. La cámara es de hormigón, construido sobre roca en la costa; la turbina es una Wells doble con un generador de 40 kW.

OWC BUQUE KAIMEI.- El Kaimei es una estructura flotante similar a un barco grande, que alberga varios tipos de turbinas en sistemas OWC, Fig III.34. El barco, anclado ante la costa japonesa, está conectado a ésta con un cable submarino para el transporte de la energía; tiene el fondo plano, de 80 metros de eslora y 12 metros de manga.

Consta de dos filas paralelas de 11 tubos de 25 m² de sección transversal, que funcionan como cavidades resonantes, de modo que se aprovechan las crestas y los valles de las olas para generar un empuje de aire hacia arriba o hacia abajo, que al ser expulsado o absorbido por la cavidad mueve una turbina de aire; utiliza varios tipos de turbinas, siendo su potencia máxima de 2 MW.

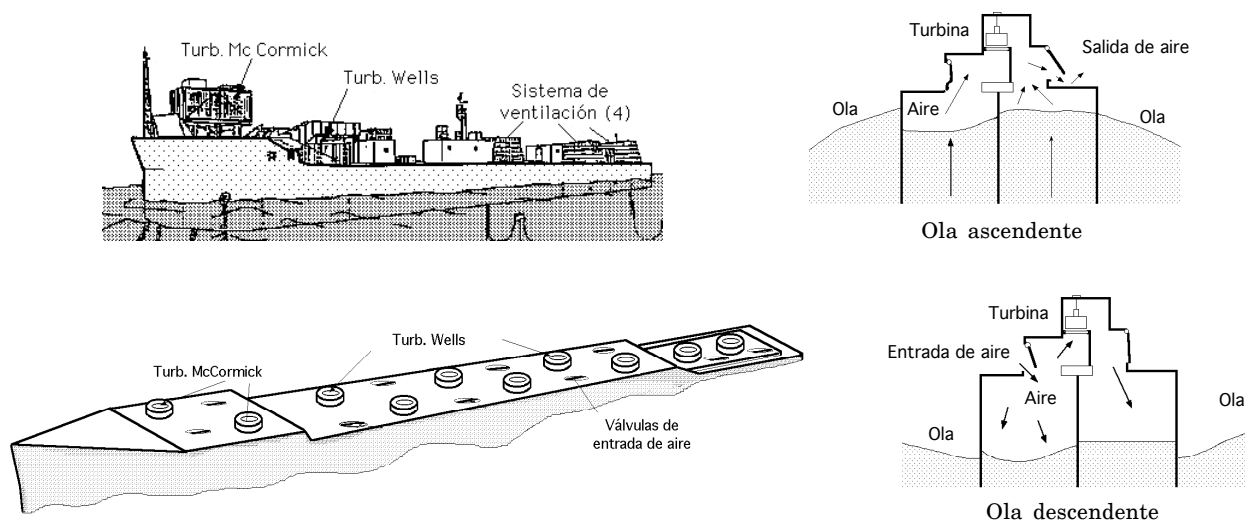


Fig III.34.- Buque Kaimei

OWC SAKATA.- Es un dispositivo con cinco cámaras que forman parte del rompeolas de un puerto. Es un cajón de (20 x 18) m, fabricado en dique seco y situado y anclado en el fondo mediante balasto de arena; la sala de máquinas alberga una turbina Wells tándem y un turbogenerador de 60 kW; opera desde 1989.

OWC de KUJUKURI.- Actualmente en construcción en Kujukuri-Cho, Japón, consta de diez OWCs de 2 m de diámetro y 2 m de altura, con una potencia de 30 kW; su ubicación está por delante de un antiguo rompeolas.

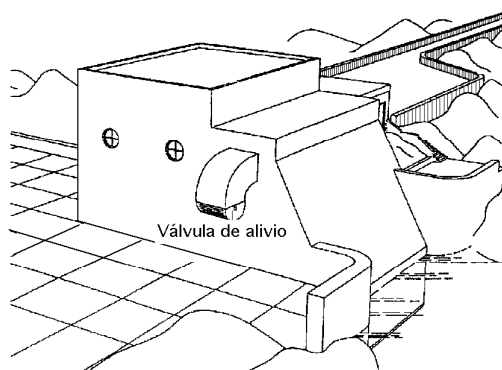


Fig III.35
Perspectiva de la central de Pico, Azores

OWC de PICO.- Se ha construido un OWC en Pico, Azores, que consta de un canal natural en la costa que concentra, por difracción, la energía del oleaje hacia el dispositivo generador, que consiste en una cámara o cajón de hormigón fabricada en dique seco de (12 x 8) m; lleva una turbina hélice de 0,5 MW, que acciona un generador asíncrono OWC **BBDB.-** Es un OWC flotante, cuya abertura de entrada de la cámara está situada hacia la costa, (opuesta al oleaje). Tiene la ventaja de un mejor rendimiento y una disminución de las fuerzas sobre el anclaje; existen prototipos en fase de prueba en Nagaya.

OWC MIGHTY WHALE.- Genera 110 kW, con un frente de 30 m y 40 de longitud. La novedad de este OWC es un componente estabilizador que reduce su tendencia de movimientos giratorios sobre la superficie del agua. Tiene una alta eficacia, estimada en un 60%, y pequeñas fuerzas de anclaje.

OWC de CHINA.- El Instituto de Conversión de la Energía de Guangzhou, ha construido un prototipo de OWC de (4 x 10) m en la costa de la isla de Dawanshan en el sur del Mar de China; tiene una potencia de 30 kW.

OWC con FLAP.- Consiste en proteger la turbina neumática contra los impactos del agua, separando la cámara de aire, del mar, mediante una compuerta basculante. Su baja eficiencia no le ha permitido pasar de la etapa de diseño.

III.7.- ATENUADORES

Se colocan paralelos a la dirección de avance de las olas, y son estructuras largas que van extrayendo energía de modo progresivo; están menos expuestos a daños y requieren menores esfuerzos de anclaje que los terminadores, pues las fuerzas se compensan a ambos lados de la estructura, siendo capaces de captar energía por ambos lados de la misma.

OWC BOLSA DE LANCASTER.- Consiste en una estructura de hormigón, con forma de buque, con unas bolsas flexibles llenas de aire colocadas a lo largo de ella.

Las olas actúan lateralmente sobre las bolsas flexibles de forma que, aprovechando la situación de las crestas y valles de las olas, y mediante un sistema de válvulas, provocan el accionamiento de unas turbinas de aire convenientemente colocadas, Fig III.36.

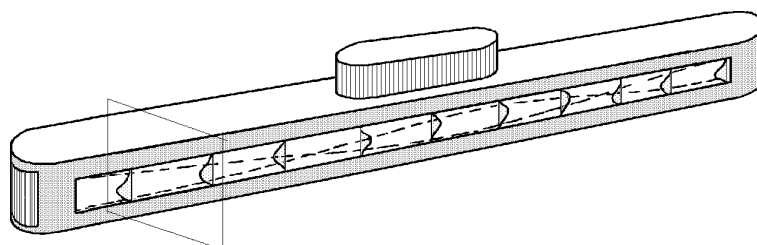
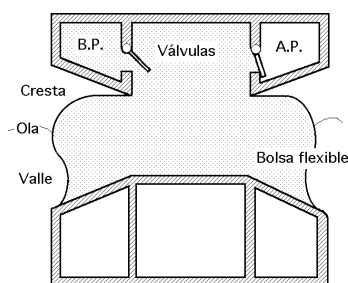


Fig III.36.- Bolsa de Lancaster

OWCs 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 varios 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.