VI.- TÉCNICAS QUE APROVECHAN LA ENERGÍA DE LAS OLAS (II)

pfernandezdiez.es

VI.1.- SISTEMAS NEUMATICOS

OWC Clam.- El Clam de Loch Ness es una estructura flotante de forma toroidal de 60 m de diámetro y 8 m de altura, Fig VI.1. 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. Las membranas se deforman por la acción del oleaje, de las que tres cuartas partes, aproximadamente, están sumergidas. El interior de las membranas contiene aire a una presión de 15 kPa.

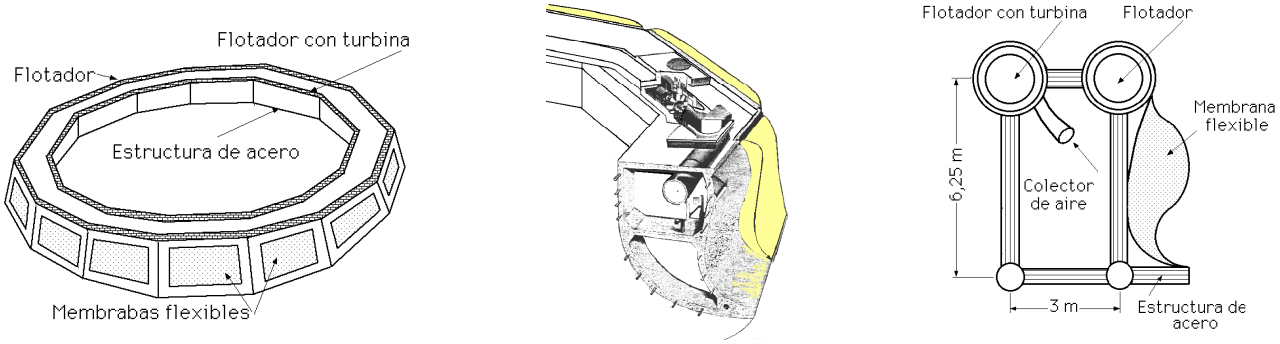


Fig VI.1.- Clam toroidal, modelo de Loch Ness

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. En la Fig VI.2 se

presenta otra disposición de un Clam longitudinal compuesto por módulos de 290 m en el que la dirección del oleaje forma un cierto ángulo con el dispositivo, diseñado para instalar en las islas Hébridas.

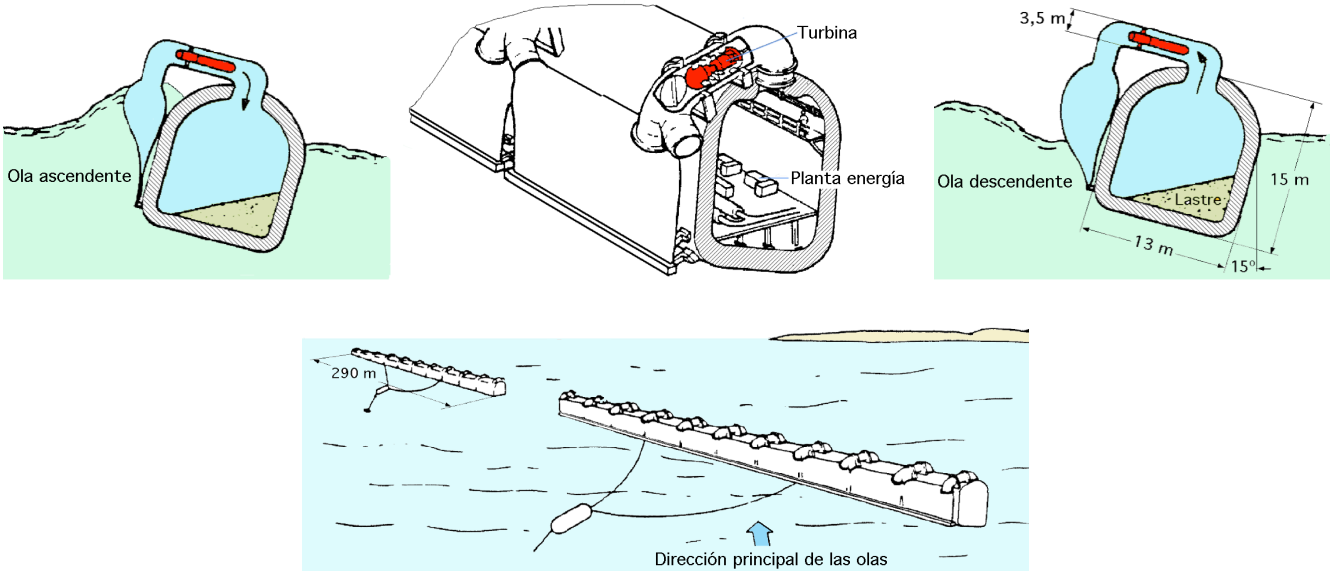


Fig VI.2.- Clam longitudinal en alta mar

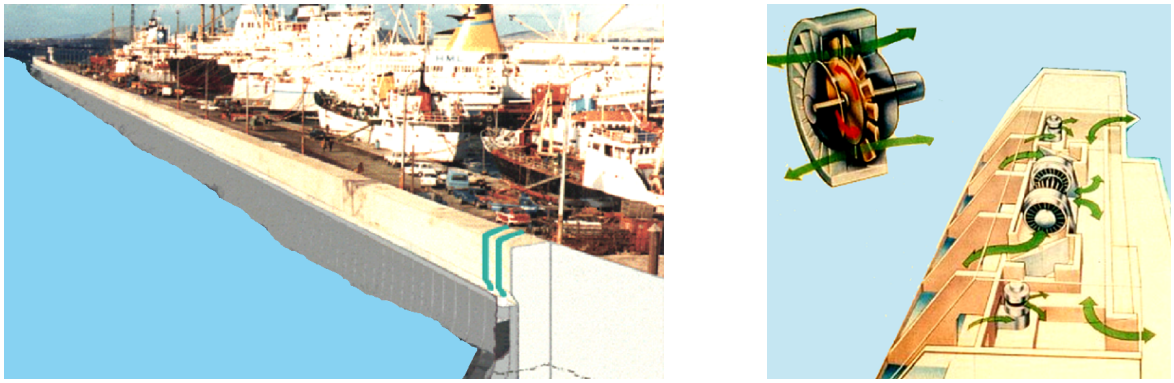


Fig VI.3.- Clam longitudinal en dique

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 del 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 una turbina de aire acoplada a un generador eléctrico. 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.

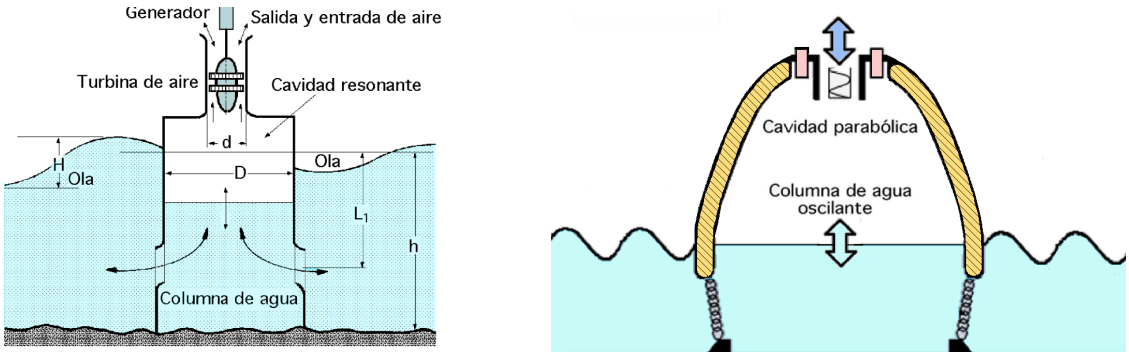


Fig VI.4.- OWCs neumáticos anclados al fondo, con cavidades cilíndrica fija y parabólica flotante

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 VI.4.

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:

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

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

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

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

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.

Estas turbinas mantienen el sentido del giro, con independencia de la dirección del flujo. La turbina de estas características más difundida, es la Wells, axial, Fig VI.5, 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.

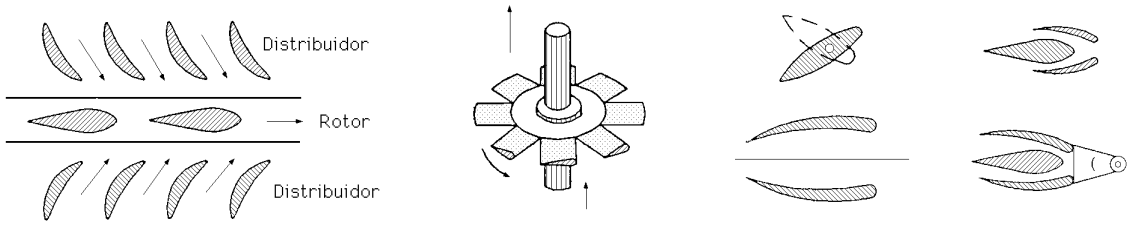
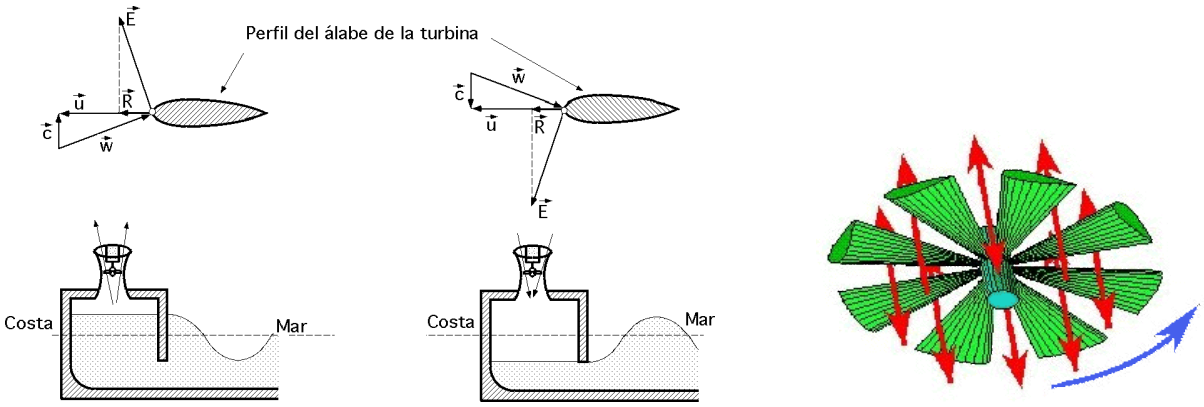


Fig VI.5.- Turbina Wells



$\vec{c}$ es la velocidad de salida del aire, $\vec{w}$ es la velocidad relatIva del aire, $\vec{u}$ es la velocidad periférica de la turbina
E es el empuje aerodinámico, y R es la resultante, igual en las dos situaciones

Fig VI.6.- Principio del funcionamiento del OWC de columna oscilante

Otra turbina autorectificadora es la McCormick, Fig VI.7, 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 VI.8, con un rotor y dos distribuidores y la de Filipenco, Fig VI.9, con tres rotores y dos distribuidores.

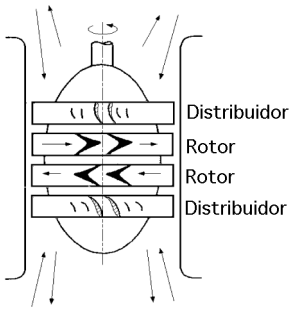


Fig VI.7.- Turbina Mc Cormick

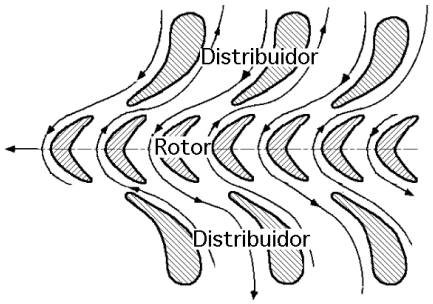


Fig VI.8.- Turbina Babinsten

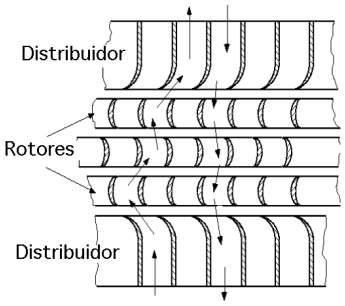


Fig VI.9.- Turbina Filipenco

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 VI.10. 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.

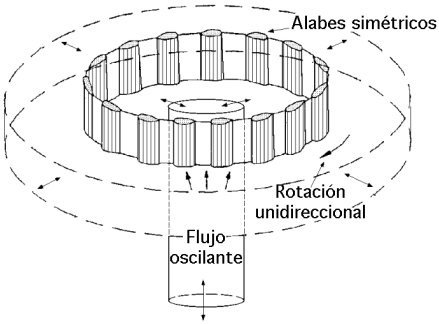


Fig V.10.- Turbina radial con rotor de álabes simétricos

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.

VI.2.- 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. 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 las Figs VI.11 se presentan vistas de detalle, general y panorámica del convertidor NEL; 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 lineas 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 m^2 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.

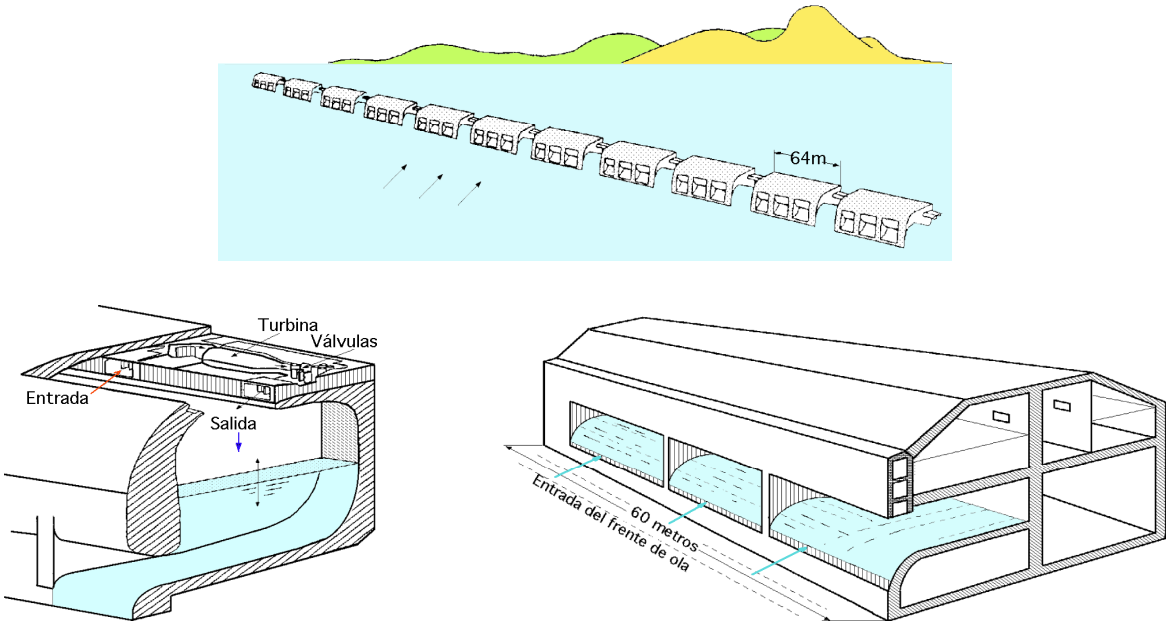


Fig VI.11.- Esquema operativo NEL de columna de agua oscilante

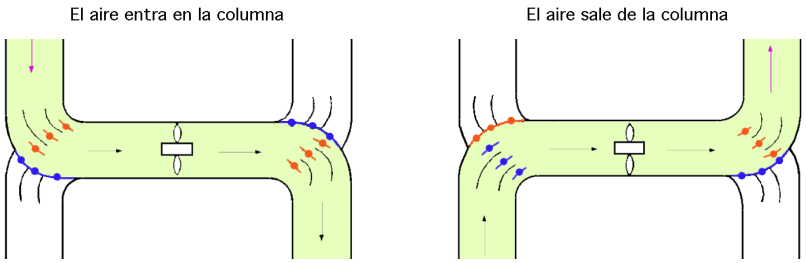
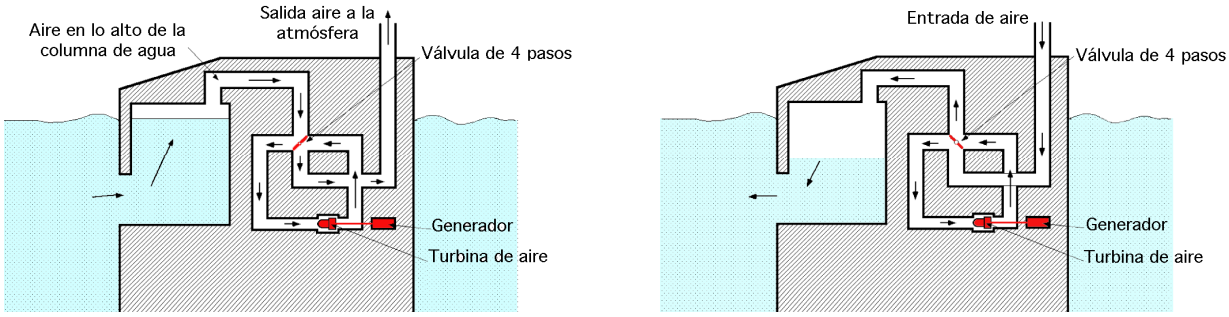


Fig VI.12.- Sistema operativo NEL de válvulas (4 grupos)



Columna de agua ascendente

Columna de agua descendente

Fig VI.13.- Sistema operativo NEL de válvula de 4 pasos

OWC de la isla de Islay.- En la Fig VI.14 se presenta una foto de la instalación, y en la Fig VI.15 el esquema operativo del funcionamiento del prototipo de Islay (Escocia), de 75 kW, y 17x 3 m, que aprovecha tanto la cresta 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. En 1987 se inicia su construcción y la obra civil se concluye en 1989; se estudió y analizó la potencia hidroneumática dentro de la cámara de aire, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos se proyectaron el equipo mecánico y eléctrico, cuya instalación fue terminada en 1991. El alternador, acoplado directamente a la turbina, genera electricidad a 440 V que, posteriormente, se transforma a 11 kV, conectando la planta a la red, 1993.



Fig V.14.- OWC isla de Islay

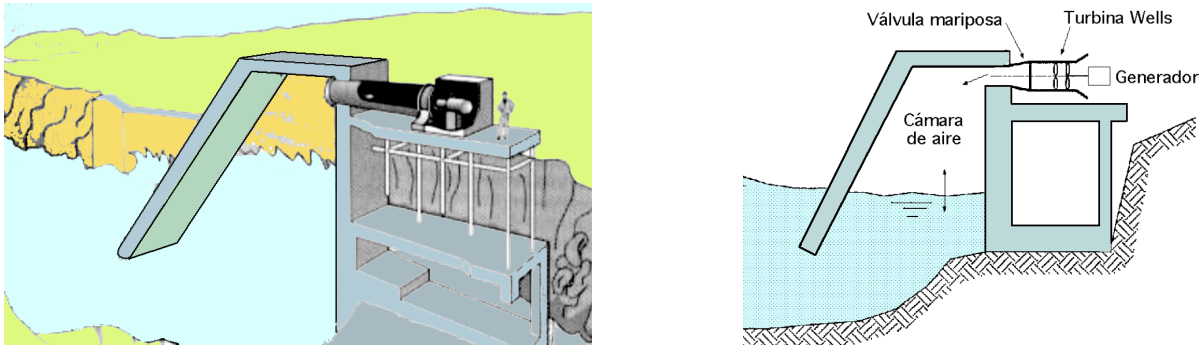


Fig VI.15.- Esquemas operativos del OWC isla de Islay

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 VI.16. 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.

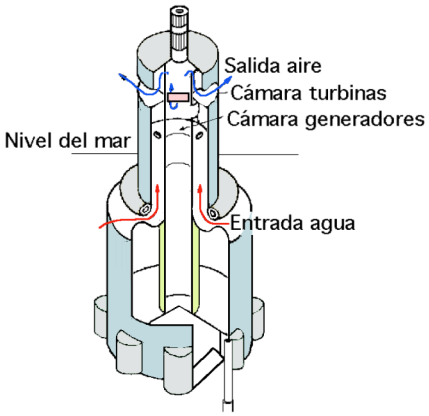
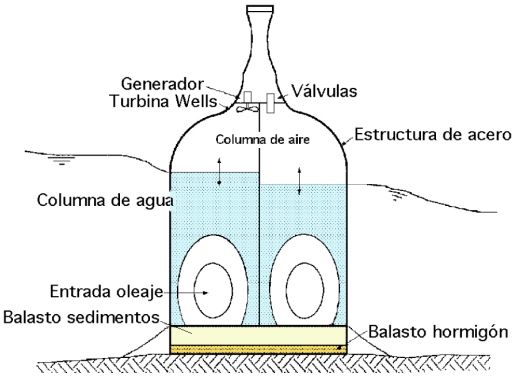


Fig V.16.- Convertidor Belfast

El principio operativo 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.

ART Osprey.- Es un OWC de forma semiesférica de 20 de altura que contiene dos cámaras de aire, Fig VI.17; colocado en el fondo del mar, a unos 18 m de profundidad, tiene su salida equipada con dos turbinas 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; fue fijada al fondo del mar por balasto de sedimentos y hormigón, en 1992.



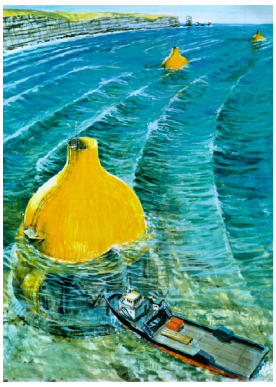
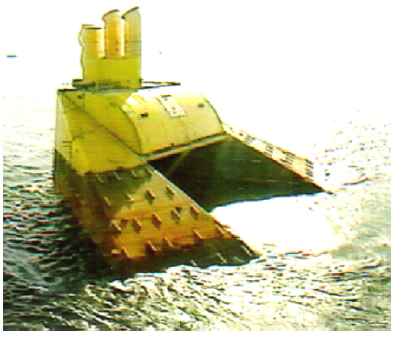


Fig VI.17.- OWC Art Osprey



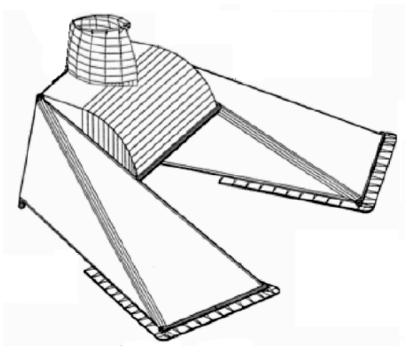


Fig VI.18.- OWC Steel Osprey (Escocia)

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.

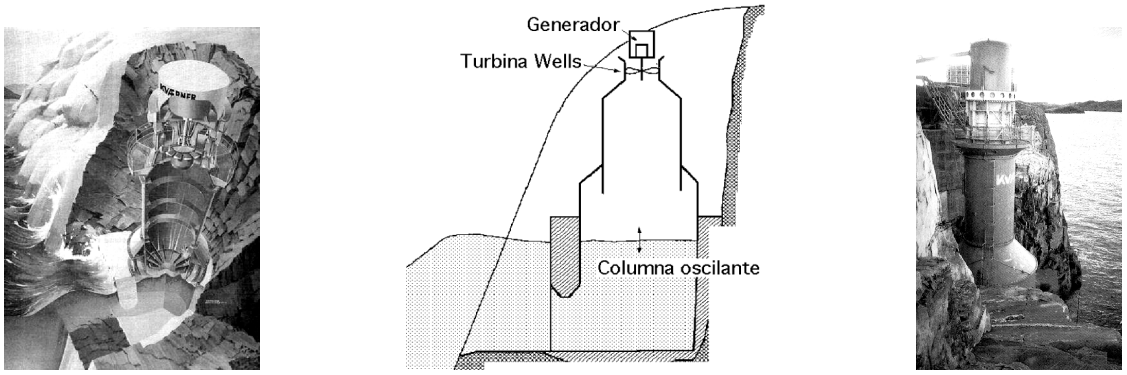


Fig VI.19.- OWC Kvaerner (Toftestallen)

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. Las olas penetraban por la parte inferior del cilindro y desplazaban hacia arriba la columna de aire, que impulsaba una turbina Wells autorectificadora de 0,5 MW instalada en el extremo superior del tubo, Fig VI.19.

OWC de Madras (India).- Este OWC se construyó en la costa de Kerala, cerca de Trivandrum, India, y genera 150 kW desde 1991, Fig VI.20. 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.

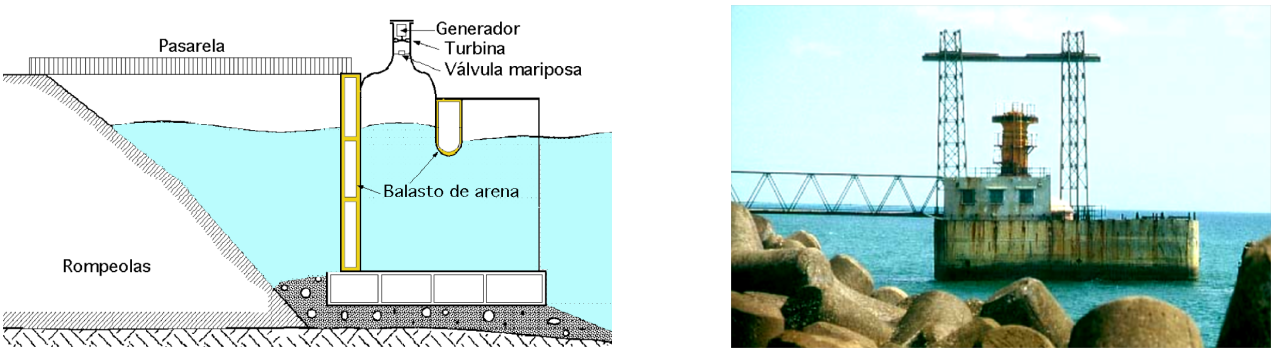


Fig VI.20.- OWC de Madrás

OWC Boya Masuda.- 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 VI.21.

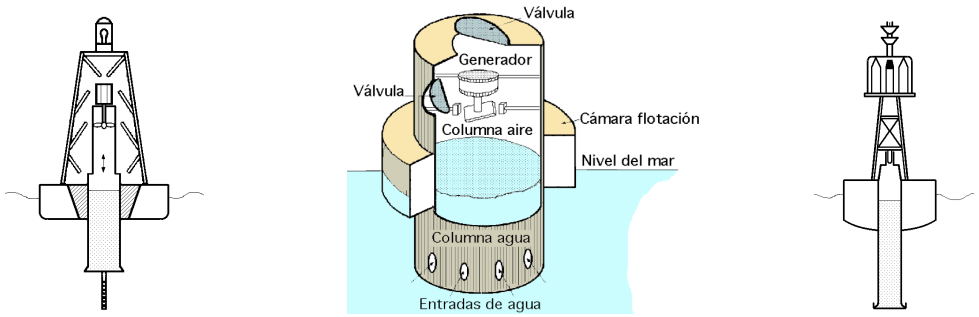


Fig VI.21.- Boya Masuda

OWC Sanzei (Japón).- El OWC de Sanzei, Japón, es similar al dispositivo de Islay; la cámara es de hormigón, construida en la costa sobre roca; la turbina es una Wells doble con un generador de 40 kW.

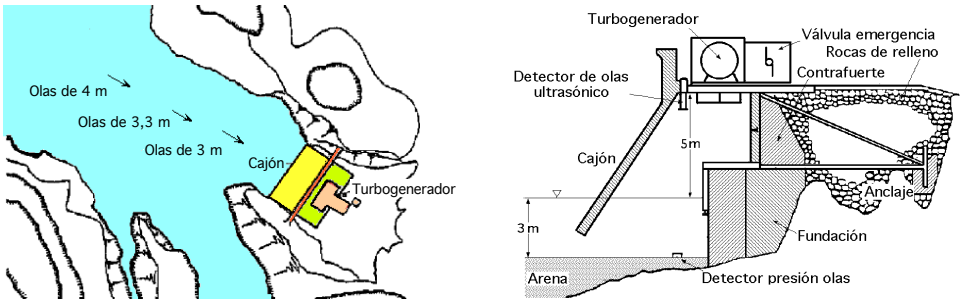


Fig VI.22.- Prototipo de Sanzei de 40 kW

OWC Buque Kaimei.- Es una estructura flotante similar a un barco, que alberga varios tipos de turbinas en sistemas OWC, Fig VI.23.

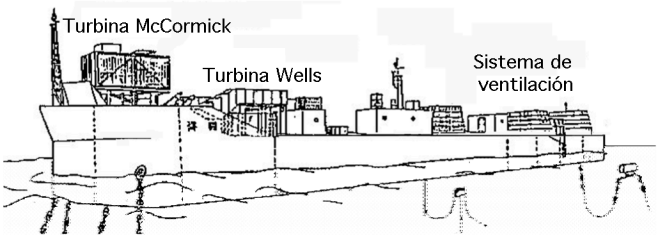


Fig VI.23.- Buque Kaimei

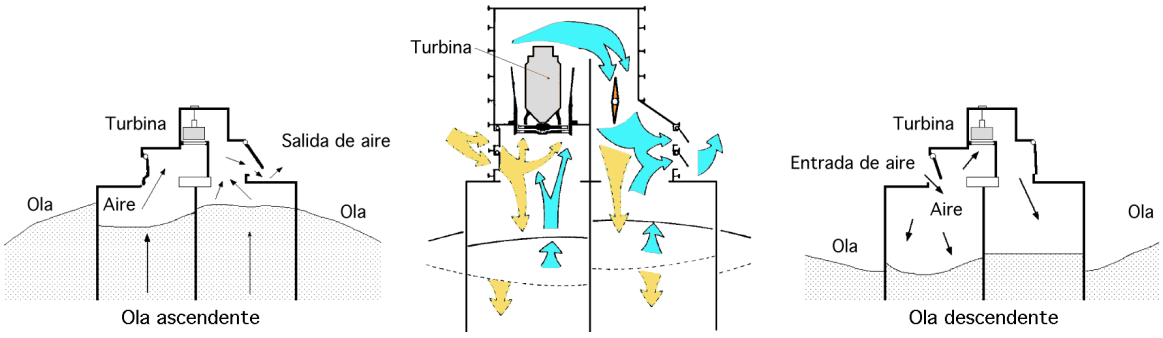


Fig VI.24.- Esquemas del funcionamiento de turbinas del buque Kaimei

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, 80 m de eslora y 12 m de manga. Consta de dos filas paralelas de 11 tubos de 25 m^2 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 varios tipos de turbinas, Fig VI.24, siendo su potencia máxima de 2 MW, instaladas en los siguientes períodos: 0,375 MW en 1978/79, 1 MW en 1979/80, y 0,56 MW en 1985/86.

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; la sala de máquinas alberga una turbina Wells y un turbogenerador de 60 kW; opera desde 1988.

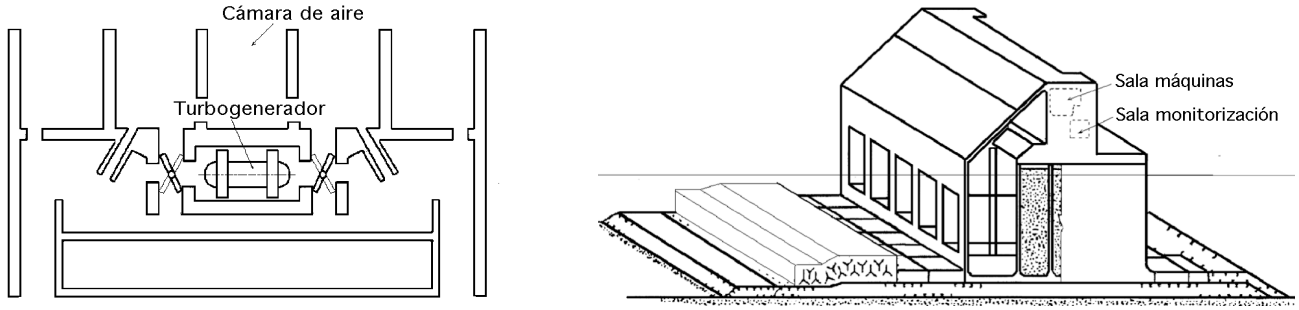


Fig VI.25.- OWC Breakwater, planta de demostración de 60 kW en el puerto de Sakata

OWC de Kujukuri.- Esta instalación estuvo operativa desde 1988 a 1997. Constaba de diez OWCs de 2 m de diámetro y 2 m de altura, de forma que el aire emitido por cada OWC era conducido a un depósito a presión para ser posteriormente conducido a una turbina de 30 kW; su ubicación estaba por delante de un antiguo rompeolas.

OWC Kvaerner de Tongatapu.- Kvaerner Brug ha desarrollado una planta comercial en Tonga en los acantilados de Tongatapu, Fig VI.26, parecida a la de Noruega. Sus características principales son: Profundidad a pie de cámara: 7 m; Area de la cámara: 50 m^2; oscilación máxima de la cámara: ± 3,5 m; Alternador: 600 kW a 1500 rpm; Conexión a red: Convertidor AC-DC-AC.



Fig VI.26.- OWC de Tongatapu

OWC de Pico.- Se ha construido un OWC en Pico, Azores, Fig VI.27, 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, a 1500 rpm, que acciona un generador asíncrono.

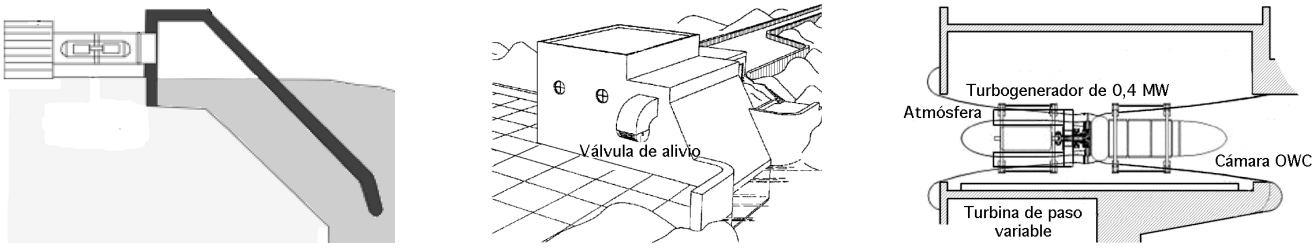


Fig VI.27.- Esquema de la central de Pico, Azores, y detalle de la turbina

OWC Mighty Whale.- Operativo desde 1998, es el OWC flotante mayor del mundo; tiene 50 m de longitud, 30 m de anchura y 12 de profundidad, y dispone de 3 turbinas, una de 50 kW, y otras dos de 30 kW, que generan en total 110 kW. La novedad de este OWC es un componente estabilizador que reduce su tendencia de movimientos giratorios sobre la superficie del agua.

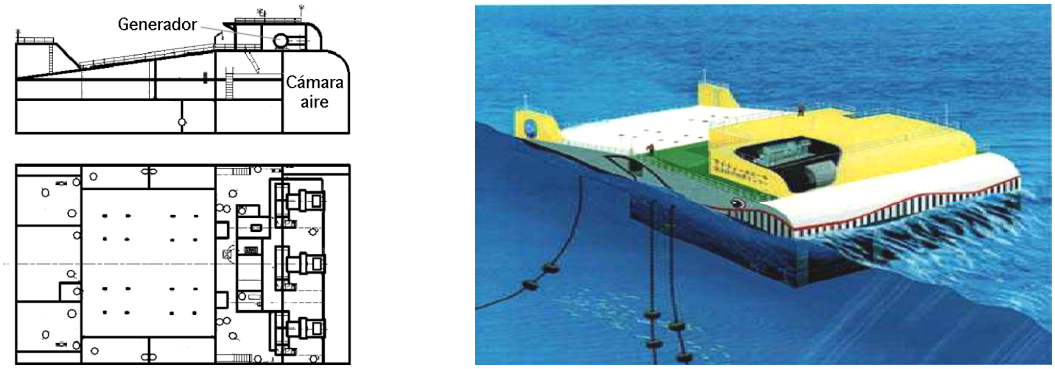


Fig VI.28.- OWC Mighty Whale

Remolcado a 1,5 km de la entrada de la bahía de Gokasho, fue anclado en un fondo de cerca de 40 m, mediante seis líneas de amarre, diseñadas para soportar tifones. Utiliza tres columnas oscilantes de agua que introducen aire comprimido en las turbinas. Una válvula de seguridad protege las turbinas de aire contra tiempos tempestuosos desconectando el flujo de aire si la velocidad de rotación de las turbinas excede de un nivel predeterminado. Como absorbe y convierte la mayor parte de la energía de la ola, se crea una zona de aguas tranquilas detrás de ella, característica que se puede aprovechar para su utilización en piscicultura.

OWC Energetech.- Energetech Pty Ltd de Energetech Australia ha fabricado un prototipo de un nuevo sistema de columna de agua oscilante, que utiliza una pared parabólica que focaliza la energía de las olas en la columna.

La turbina tiene 1,6 m de diámetro, 21 álabes, y gira a 500 rpm. La potencia de pico instalada es de 500 kW; está conectada a la red vía cable submarino 11 kV

La energía generada indica que funciona mejor que lo previsto en los ensayos; con olas de 2 m y período de siete segundos, el dispositivo genera 320 kW, frente a los 268 kW que generaba en laboratorio; una fracción de la energía generada se utiliza para producir 3000 Tm diarias de agua desalinizada a bordo del dispositivo.

El OWC situado a 200 m de Port Kembla pesa 485 Tm, siendo sus dimensiones: Longitud 36 m; anchura 35 m; profundidad 12 m; está construido en acero

La valoración aproximada de la energía generada por el dispositivo depende de las condiciones del mar en cada día.

Un focalizador parabólico de dimensiones 40 m de ancho, 20 m de longitud, y longitud focal 5 m, con una amplitud de la cresta de la ola de 1 m, podría generar entre 1 y 2 MW.

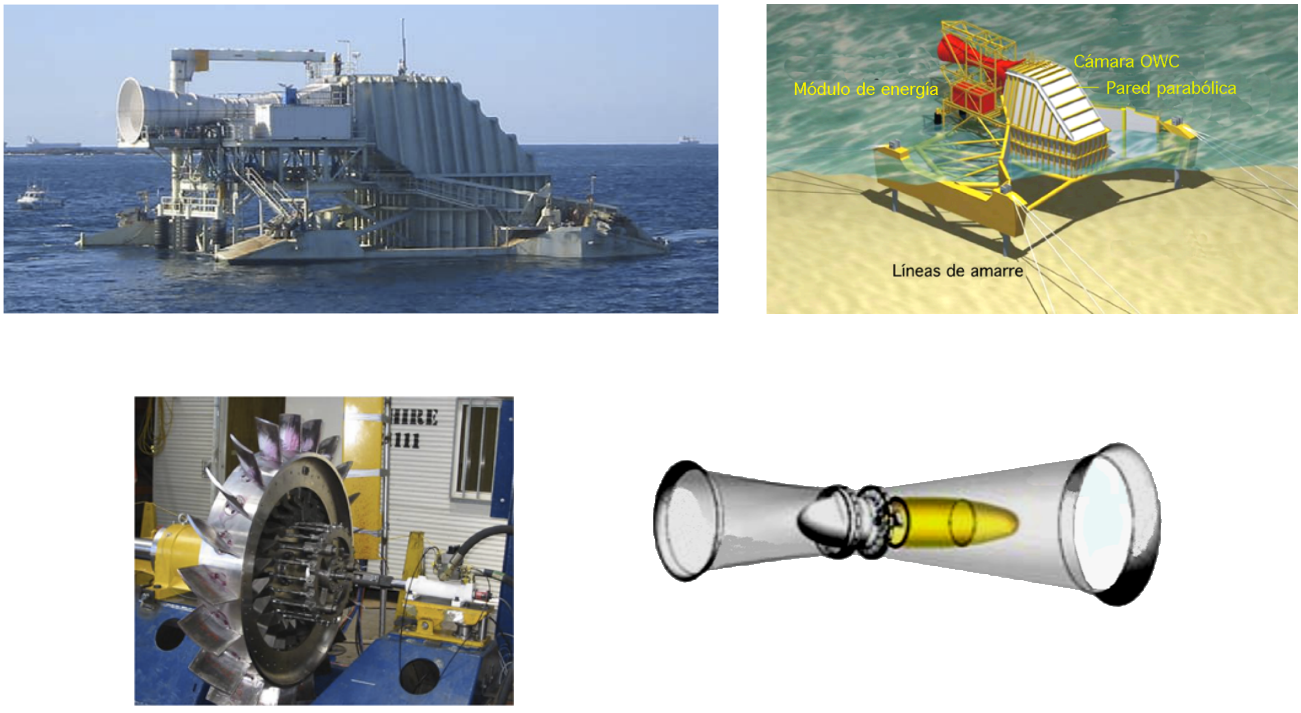
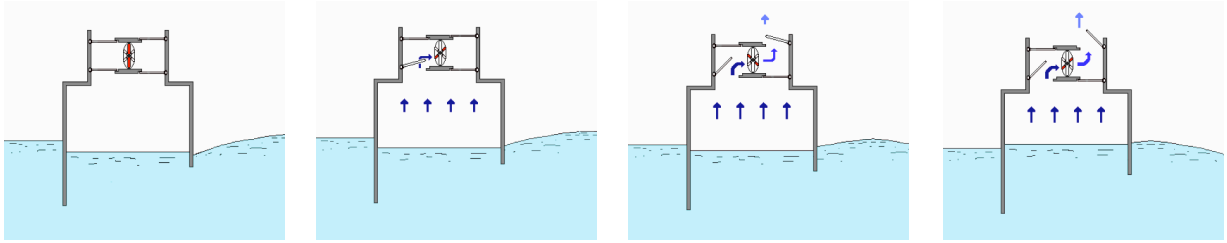


Fig VI.29.- OWC Energetech, disposición general y forma de la turbina de aire



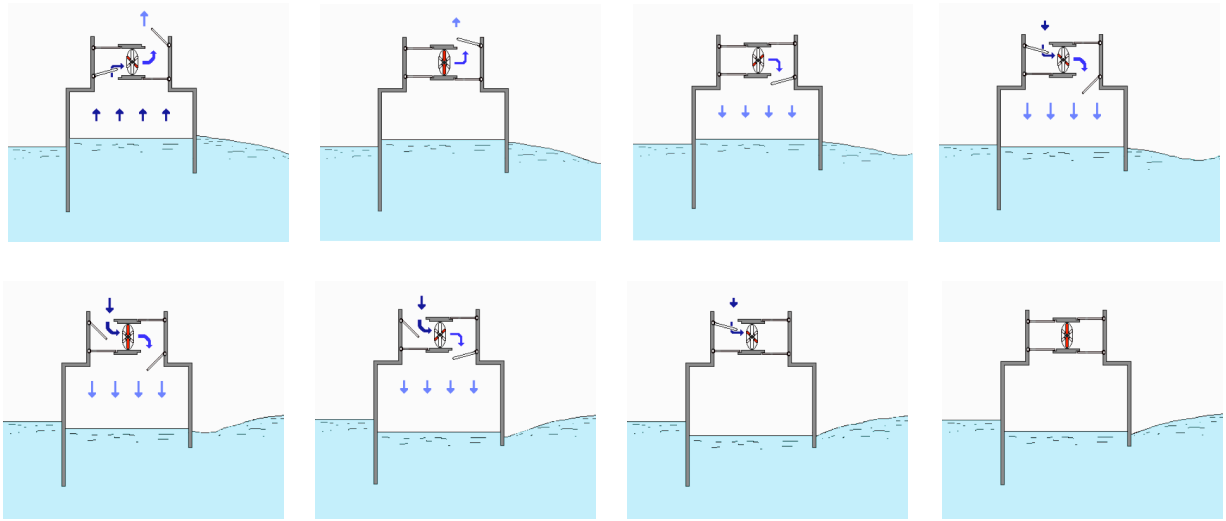


Fig VI.30.- Esquema de funcionamiento de un OWC neumático

VI.3.- 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, (Airbag).- Consiste en una estructura de hormigón, con forma de buque, con unas bolsas flexibles llenas de aire colocadas a lo largo de ella. Es, por lo tanto, una estructura tipo Clam. 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 VI.31.

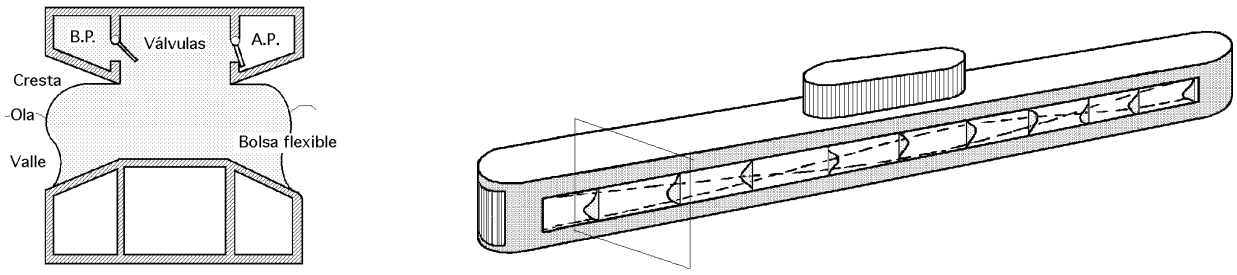


Fig VI.31.- Bolsa de Lancaster