REVISTA DE OBRAS PUBLICAS, Septiembre 1986. Págs. 675 a 689

Historia, clasificación y selección de los generadores de energía del oleaje(*)

Por CESAR VIDAL PASCUAL
Ingeniero de Caminos, C. y P.

La selección de un sistema para el aprovechamiento de la energía del oleaje debe tener en cuenta diversos criterios, que se estudian en el artículo, que incluye una clasificación y descripción de los sistemas más conocidos.

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

En un artículo anterior (1) se concluye que, tras el análisis de la distribución temporal y espacial de la energía del oleaje, las costas del Norte y Noroeste presentan favorables condiciones para el aprovechamiento de la energía de las olas. No obstante, se hace hincapié en la extremada irregularidad de esta fuente de energía, lo cual condiciona el diseño de los sistemas de aprovechamiento, que además de ser eficientes, deberán soportar las cargas extremas del oleaje.

El objetivo de este trabajo es la selección de un sistema para el aprovechamiento de la energía del oleaje con vistas a un estudio más detallado de su comportamiento.

Tras un primer apartado dedicado a un breve repaso histórico se procederá a la clasificación y descripción de los sistemas más conocidos. Mediante criterios preestablecidos se seleccionan las características que debe poseer el sistema elegido, que se describe a grandes rasgos en el apartado 5.

2. RESUMEN HISTORICO

Contrariamente a lo que se pudiera pensar, el número de patentes para el aprovechamiento de la energía del oleaje es muy numeroso. La primera patente conocida fue presentada por los franceses Girard, padre e hijo, en 1799 (2). El conocimiento empírico y romántico de la potencia del oleaje queda reflejado en el párrafo de introducción de la patente, figura 3 y en el esquema de la figura 1.

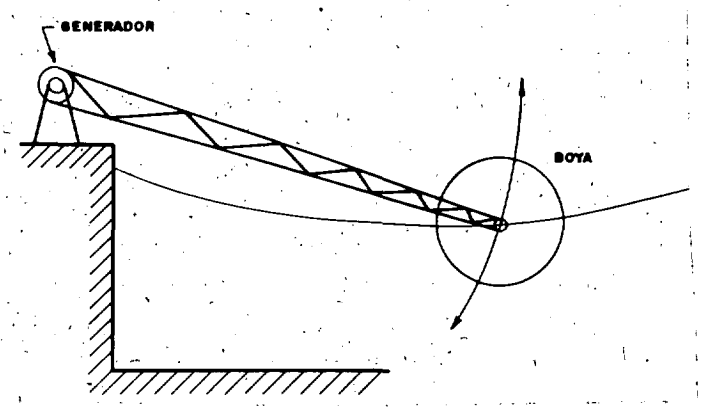


Figura 1.—Esquema de la patente de Girard (1799).

Un estudio realizado por el NEL (3) indica que entre 1860 y 1890 el ritmo de presentación de patentes sobre este tema es de alrededor de tres por año, alcanzándose seis por año entre 1900 y 1930. Posteriormente, entre 1930 y 1970 disminuye el incremento debido a la utilización masiva del petróleo para la producción de energía. A partir de 1970 y debido al incremento del precio de los crudos se vuelve a recuperar el ritmo de presentación de los años 1900-1930. Entre 1856 y 1973 había registradas en el Reino Unido 340 patentes sobre el tema. Mc Cormick (4) indica que existen cerca de 1000 patentes registradas sumadas las de Japón, USA y Europa Occidental.

En el desarrollo de los sistemas para el aprovechamiento de la energía del oleaje se pueden marcar los siguientes hitos:

a) Diseño por Bochaux-Praceique de un sis-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1986.

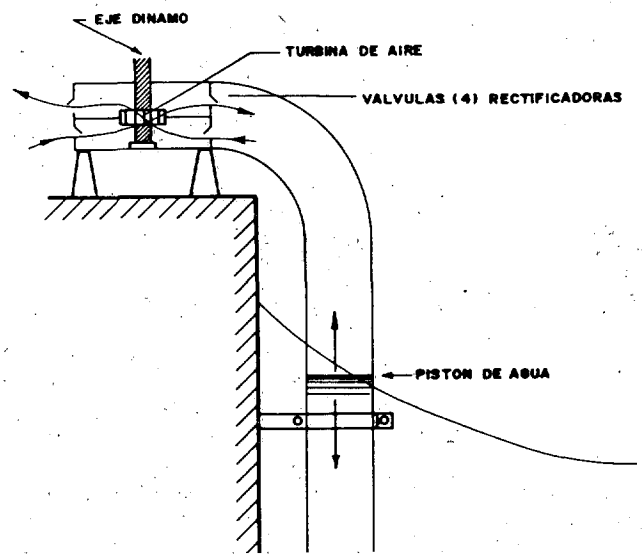


Figura 2.—Esquema del sistema de Bochaux-Praceique (1910).

tema hidroneumático para el suministro de electricidad a su casa de Rayon, cerca de Burdeos, en 1910. Esta unidad marca la primera generación con éxito de energía eléctrica (1 KW) mediante el sistema esquematizado en la figura 2.

El oleaje crea variaciones de presión en la boca del tubo las cuales ponen en movimiento el pistón de agua atrapado en el interior, el cual a su vez bombea el aire a través de un sistema de válvulas rectificadoras, fabricadas de cuero, hacia una turbina de reacción.

b) La Segunda Guerra Mundial hace dar un salto al conocimiento de la dinámica del oleaje. En esta época comienzan los trabajos de Y. Masuda, del Japan Marine Science and Technolgy Center (JAMSTEC), que actualmente tiene cerca de 600 boyas-faro hidroneumáticas de 100 W operando en el mundo. En la actualidad encabeza el equipo del «KAIMEI», barco de prueba para turbinas neumáticas, en operación en el Mar del Japón y con alrededor de 1 MW instalado.

c) A partir de 1975, al apoyar el Gobierno del Reino Unido a Universidades y Laboratorios para el estudio del aprovechamiento de la energía del oleaje, con vistas a la producción eléctrica, se produce una serie de sistemas, cuidadosamente diseñados. El ejemplo de Reino Unido ha llevado a otros países: Suecia, Noruega, Irlanda, USA, Canadá, Sudáfrica, Japón a establecer sus propios programas de estudio.

En España se han presentado también un buen número de patentes, algunas en el siglo pasado. Recientemente (1981), el Centro de Estudios de la Energía ha patrocinado un estudio denominado Proyecto Geomar para el análisis del comportamiento de una boya hidroneumática dotada de turbina autorrectificadora (5). Con ello se han obtenido rendimientos primarios máximos del 40 por 100 y se ha estimado un costo del KWh producido en unas 30 pesetas.

3. CLASIFICACION

Para describir los sistemas de aprovechamiento más prometedores vamos a proceder a establecer un sistema de clasificación:

3.1 Clasificación en cuanto a la capacidad de control

Cualquier objeto forzado a moverse en el agua es capaz de generar oleaje; inversamente, de cualquier cuerpo sumergido, solicitado por el oleaje, se puede extraer energía si se le somete a las fuerzas amortiguadoras y restauradoras adecuadas.

Puesto que las fuentes inducidas por el oleaje son variables segundo a segundo, el sistema más eficiente será aquél que ajuste en cada instante las fuerzas de extracción en cada uno de los seis modos de libertad del cuerpo flotante.

En la práctica, el problema se simplifica dejando sólo uno o dos movimientos libres.

Si clasificamos los sistemas por el grado de control sobre las fuerzas extractoras (amortiguadores y restauradores), podemos considerar tres clases:

CLASE I

En cada instante se miden las características cinemáticas de los movimientos en los modos bajo control, para acomodar las fuerzas de control de manera que se optimice el rendimiento.

CLASE II

Sólo se miden características medias del oleaje y el control de optimiza con ellas.

CLASE III

El sistema se diseña con una curva de rendimientos fija, sin capacidad de control sobre las fuerzas amortiguadoras.

3.2 Clasificación en cuanto al sistema de conversión

a) Sistemas mecánicos: Los desplazamientos elegidos para la extracción se materializan en la movilidad de una parte o la totalidad de la estructura en las direcciones seleccionadas, contra una referencia fija o cuasi-fija.

b) Sistemas hidroneumáticos de cámara abierta: La parte móvil es un pistón de agua atrapado en un recinto y comunicado con el exterior frontalmente o por el fondo. El pistón de agua bombea aire, al oscilar verticalmente excitado por el oleaje, a las turbinas, en circuito abierto a la atmósfera.

c) Sistemas hidroneumáticos de cámara cerrada: Son una derivación de los anteriores. La interfaz agua-aire se materializa mediante una lámina flexible de caucho, lo que permite reducir considerablemente las dimensiones de la cámara.

3.3 Clasificación en cuanto a la modificación que producen en el oleaje incidente

a) *Terminadores o reflectores*

El establecimiento de una pared reflectora tras el sistema permite alcanzar, teóricamente al menos, el 100 por 100 de eficiencia de conversión, medida ésta como

$$E_H = \frac{\text{Energía absorbida en un tiempo T por una estructura de longitud L}}{\text{Energía incidente en un tiempo T en una longitud de cresta L}}$$

b) *Atenuadores*

Si un sistema se diseña como un barco, de manera que se estacione con su eje mayor perpendicular a las crestas, la energía se cede lateralmente al sistema por difracción. La longitud del «barco» y la distancia entre ellos son variables a determinar económicamente. Estos sistemas suelen ser menos eficientes que los terminadores pero como contrapartida tienen menores requerimientos de anclaje y suelen ser menos masivos.

3.4 Clasificación en cuanto al sistema de fijación

a) *Fijos al fondo*

Puede ser por gravedad o mediante anclajes y quedar sumergidos o cortar la superficie. Aseguran la completa inmovilidad de los grados de libertad que necesitan estar coartados. Necesariamente, deben ser instalados en profundidades medias o reducidas.

b) *Anclados en tensión*

Pueden quedar sumergidos o cortar la superficie. El anclaje suele ser el portador del sistema de conversión.

c) *Flotantes en modo boya*

Una línea de boyas separadas adecuadamente puede absorber con un movimiento vertical el 100 por 100 de la energía de un tren regular de ondas paralelo a la línea. El sistema de captación suele ir en el interior de la boya y ligado a la amortiguación.

d) *Flotantes con estructura de referencia*

Utilizan una estructura rígida flotante que por su longitud y orientación se mantiene estacionaria frente al oleaje, sirviendo como referencia cuasi-fija.

3.5 Clasificación en cuanto a la capacidad de amortiguación de las oscilaciones de corto período

Las oscilaciones de largo período: estados de mar, pueden ser absorbidas por los sistemas clase I y II. Las oscilaciones de corto período: grupos de ondas, ondas individuales pueden ser controladas en clase I por el sistema primario, pero antes de la transformación eléctrica requieren un colchón amortiguador, que puede ser:

a) *Sistemas colectores*

El fluido primario (aire, agua o aceite) se colecta a partir de un número suficientemente grande de unidades de conversión primaria como para poder esperar un caudal constante.

b) *Sistemas acumuladores*

No son excluyentes con los anteriores. La energía primaria se almacena en un depósito adecuado (gravedad, rotación, presión), de manera que la salida pueda ser constante.

c) *Sistemas de conversión directa*

El fluido primario de cada unidad mueve directamente un grupo. Se hace necesaria la rectificación a continua para poder colectar eléctricamente las salidas.

3.6 Clasificación por concentración del oleaje

a) *Concentración por refracción*

El oleaje puede ser refractado por un fondo adecuado de manera similar a como la luz es refractada por una lente. Si el fondo es móvil se puede acomodar su geometría de manera que el foco permanezca fijo aunque varien las características del oleaje.

b) *Concentración mediante muros convergentes*

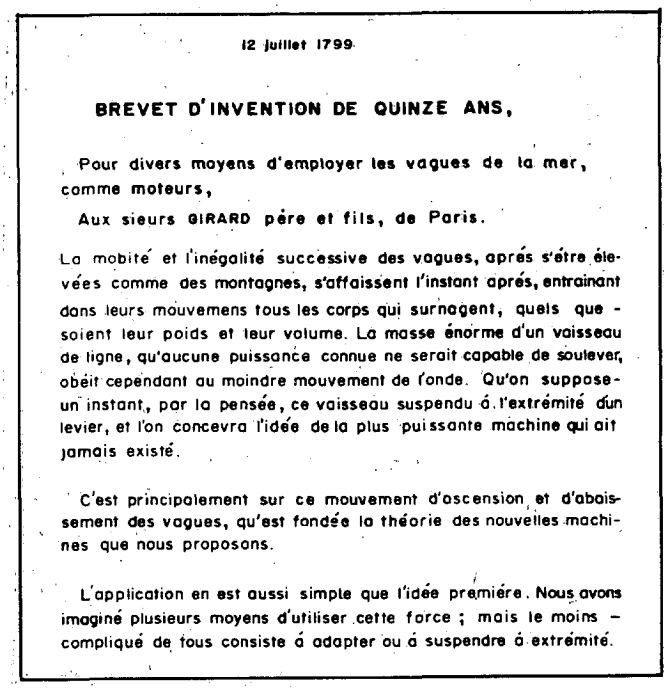
Si el ángulo de incidencia contra un muro liso es inferior a los 15°, el oleaje no llega a reflejarse, por soldadura los frentes incidentes y reflejado, produciéndose un incremento de la altura de ola.

4. DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS MAS CONOCIDOS

En la Tabla I se presentan los sistemas más importantes desarrollados a partir de 1976. Describiremos a continuación los más interesantes:

4.1 Ducks

Inventado por S. H. Salter y desarrollado por su equipo en la Universidad de Edimburgo, nace en 1974 y su desarrollo y comportamiento se describen en (6).



12 juillet 1799

BREVET D'INVENTION DE QUINZE ANS,

Pour divers moyens d'employer les vagues de la mer, comme moteurs,

Aux sieurs GIRARD père et fils, de Paris.

La mobité et l'inégalité successive des vagues, aprés s'être élevées comme des montagnes, s'affaissent l'instant aprés, entrainant dans leurs mouvemens tous les corps qui surnagent, quels que soient leur poids et leur volume. La masse énorme d'un vaisseau de ligne, qu'aucune puissance connue ne serait capable de soulever, obéit cependant au moindre mouvement de l'onde. Qu'on suppose un instant, par la pensée, ce vaisseau suspendu á l'extrémité d'un levier, et l'on concevra l'idée de la plus puissante machine qui ait jamais existé.

C'est principalement sur ce mouvement d'ascension et d'abaissement des vagues, qu'est fondée la théorie des nouvelles machines que nous proposons.

L'application en est aussi simple que l'idée premiére. Nous avons imaginé plusieurs moyens d'utiliser cette force ; mais le moins compliqué de tous consiste á adapter ou á suspendre á extrémité.

Figura 3.—La primera patente de un Geo, tomado de Ross (1979).

El último diseño de los Ducks se presenta en la figura 4. El sistema está formado por un número de «patos» flotantes articulados entre si formando una línea y orientados frente al oleaje como terminador. Cada «pato» puede girar alrededor de un eje circular situado en la parte posterior del pato.

En el interior del cuerpo del pato, en la parte delantera o «pico», se sitúa la maquinaria de ex-

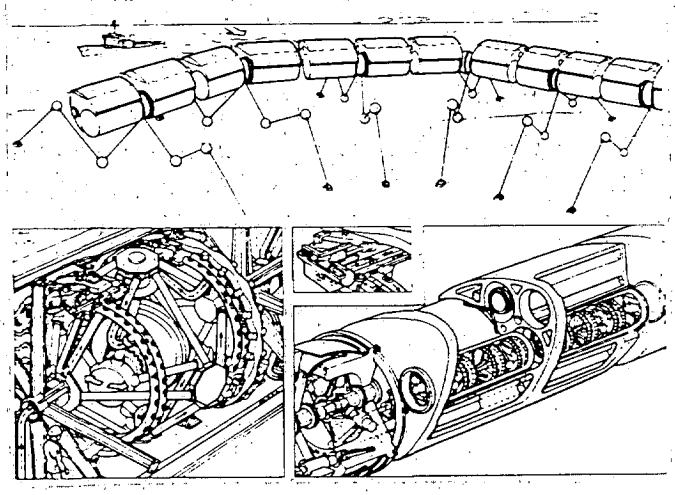


Figura 4.—Ducks en 1982 tomado, de Grove-Palmer 1982.

TABLA I

SISTEMAS DESARROLLADOS A PARTIR DE 1976

1972-1978	Wave Contouring Raft.	Sir Christopher Cockerell.	Wavepower Ltd.	U. K.
1975-1982	NEL OWC.	R. Meir, G. W. Moody et al.	National Engng. Laboratory.	U. K.
1974-1982	DUCK.	S. H. Salter.	University of Edinburg.	U. K.
1974-1982	Kaimei.	Y. Masuda et al.	IEA/Japanese Marine Science and Technology Center.	Japón, U. K. Canadá, Irlanda
1958-1978	HRS Rectifier.	R. Russell.	Hydraulics Research Station.	U. K.
1976-1982	Vickers OWC.	S. D. Drew, C. V. Chester-Browne et al.	Vickers PLC.	U. K.
1977-1982	Flexible Bag.	M. J. French.	University of Lancaster.	U. K.
1975-1978	Belfast OWC.	A. E. Long, TJT Whittaker, NAJ, Wells et al.	Queen's University, Belfast Welding Institute.	U. K.
1978-1982	Bristol Oscillating Cylinder.	D. V. Evans et al.	University of Bristol.	U. K.
1978-1982	SEA CLAM.	N. W. Bellamy.	Sea Energy Associates Ltd. Coventry (Lancaster) Polytech.	U. K.
1977-1978	Nottingham OWC.	J. G. Morley.	Nottingham University.	U. K.
1977-1980	The Triplate.	FJM Farley, H. Altman.	Royal Military College of Science Shrivenham.	U. K.
1977-1978	The Sussex Cylinder.	J. O. Flower, G. F. Knott.	University of Sussex.	U. K.
1976-1980	DAM-ATOLL.	L. Wirt.	Lockheed California Company.	U. K.
1971-1982	Concentrador por refracción.	E. Mehlum, J. Stames.	Central Institute of Industrial Research.	Noruega
1976-1979	FOR Wave Pump.	J. D. Isaacs.	Foundation for Ocean Research.	USA
1976-1982	Planta de boyas sueca.	L. Bergdahl, L. Claeson, C. Falckemo, J. Forsberg, A. Rylander.	The Group for Wave Energy Research.	Suecia
1978-1982	The KVAENER Multiresonant OWC.	N. Ambli.	Kvaener Brug A/S. Norwegian Hydrodynamics Laboratories. College of Arts and Science.	Noruega
1975-1982	The Norwegian wave power buoy.	K. Budal, J. Falnes, L. C. Iversen.	Division of Experimental Physics University of Trondheim.	Noruega
1977-1982	Heaving body G-1T.	Hirohisa Tanaka.	Dep of Mechanical Eng. Ykoama National University.	Japón

tracción, en un ambiente completamente sellado. Un sistema de giróscopos de precesión libre actúan como referencia fija frente al cabeceo del «pato», obteniéndose la energía mediante un circuito de levas hidráulicas entre el eje fijo de los giróscopos y el cuerpo móvil. El aceite a presión se envía a una turbina-motor dotada de una válvula que permite acelerar los giróscopos o mover un grupo turbina-alternador, según las necesidades de la red. Las oscilaciones de corto período pueden ser acumuladas como energía de rotación. También las articulaciones entre ducks producen aceite a presión, que se utiliza para la puesta en marcha del sistema. El giro del «pato» sobre el eje trasero se realiza sobre almohadillas hidráulicas, especialmente diseñadas para las bajas velocidades de rotación. La generación es sincrona.

El control es automático y puede ser en Clase I.

4.2 Rafts

Inventados por Sir Cristopher Cockerell, padre del Hovercraft, en 1972 y soportados por la Wavepower Ltd. hasta 1976, fecha en que empieza a recibir apoyo gubernamental.

Su desarrollo y comportamiento se describen en la referencia (7).

El último diseño, figura 5, es un terminador formado por una línea de balsas (rafts) flotantes, formada cada una por tres pontonas, dos delanteras móviles articuladas a una gran pontona posterior anclada que sirve de referencia fija y semi-reflector. La toma de potencia se efectúa en la articulación mediante una bomba hidráulica de diseño especial que bombea agua del mar a un depósito elevado sobre la pontona posterior. Dispone pues de una cierta capacidad de acumulación, aunque su control es pequeño, Clase II.

4.3. Cilindro sumergido de la Universidad de Bristol (BOC)

Desarrollado como un sistema para la producción eléctrica a gran escala por la Universidad de Lancaster, sobre una idea de D. V. Evans, a partir de 1976.

Se ha demostrado teóricamente (8), y puede confirmarse experimentalmente que cuando un cilindro sumergido gira alrededor de un eje excéntrico paralelo al suyo propio, produce un oleaje que se traslada sólo en una dirección. Inversamente, se ha demostrado (9) que un cilindro sumergido, suspendido horizontalmente por un eje excéntrico y adecuadamente solicitado con fuerzas de amortiguación y restauración, puede absorber la totalidad de la energía de un tren monocromático de ondas de pequeña amplitud.

Basándose en esta idea, se diseña el sistema de la figura 6. Las bombas hidráulicas (aceite) se sitúan sobre los propios anclajes y la flotación superabundante proporciona la fuerza restauradora. Un sistema de conductos colecta los

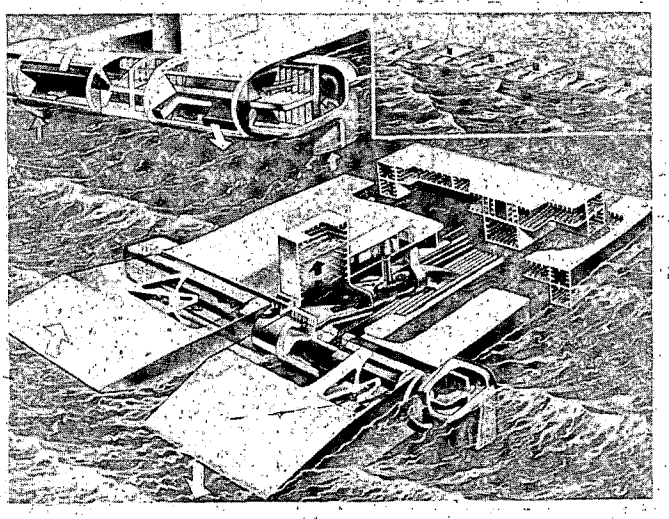


Figura 5.—Rafts en 1982 tomado, de Grove-Palmer 1982.

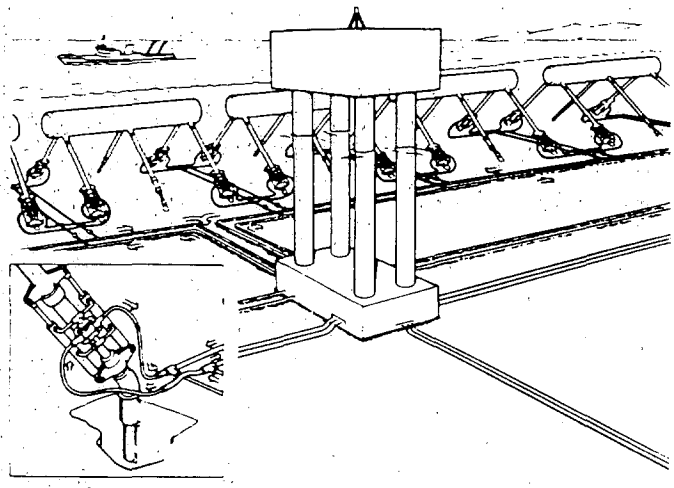


Figura 6.—Boc en 1982 tomado, de Grove-Palmer 1982.

flujos hidráulicos hacia una sala de grupos, sumergida o sobre plataforma, desde donde la energía eléctrica se envía a tierra a través de cable submarino. En caso de oleajes extremos, los cilindros pueden sumergirse hasta una profundidad que los deje a salvo de daños.

Se puede clasificar el sistema como Clase II, terminador mecánico sumergido en tensión y colector.

4.4 Lancaster Flexible Bag (LFB)

Ideado por M. J. French, de la Universidad de Lancaster en 1978 y presentado por éste en

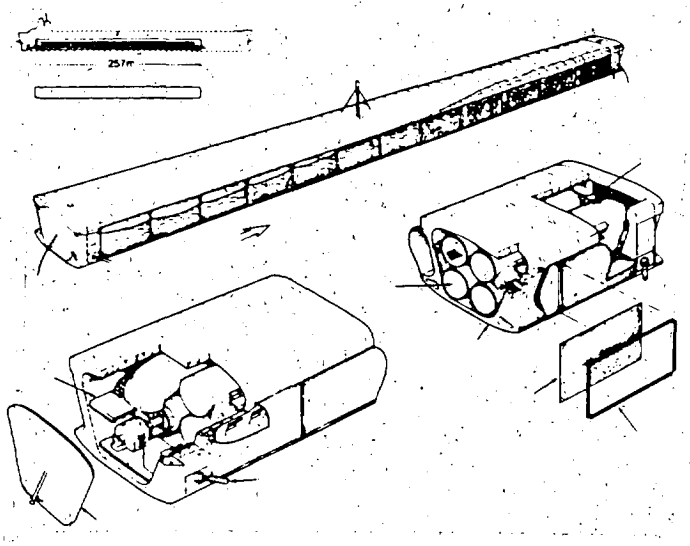


Figura 7.—LFB en 1981 tomado, de Grove-Palmer 1982.

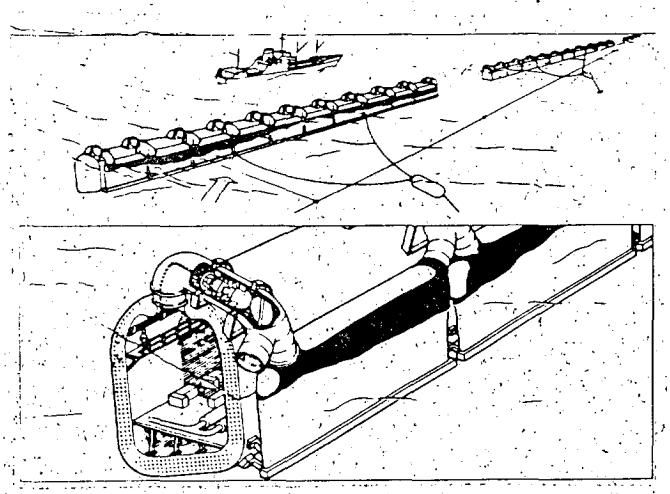


Figura 8.—Sea Clan en 1981, tomado de Grove-Palmer 1982.

(10), busca disminuir el costo de la infraestructura de los sistemas. Se encarga de su desarrollo la Wavepower Ltd.

Hasta el año 1978, los sistemas hidroneumáticos inventados eran de cámara abierta, es decir, es la propia lámina de agua atrapada en la cámara la que hace de sello para el aire. Esta disposición obliga a mantener una salvaguarda importante entre el nivel medio, el techo de la cámara y el nivel mínimo para la pantalla de cierre exterior, lo que se traduce en que la masa del pistón de agua es importante, de ahí el carácter resonante de estos sistemas.

El LFB, figura 8, consiste en un barco de hormigón pretensado que se ancla normalmente al oleaje. Va dotado lateralmente de una serie de sacos de caucho que responden como un fuelle a la acción de oleaje. En el colapso del saco, al paso de la cresta de la ola, el aire pasa, a través de unas válvulas de no retorno pasivas, a un conducto colector de alta presión relativa. De la misma manera, al paso del seno, el saco se hincha desde un conducto colector de baja presión relativa mediante otras válvulas pasivas de retención.

En la proa y popa del barco se sitúan las turbinas de aire que conectan los conductos de alta y baja presión, cerrando el circuito de aire.

El sistema se clasifica como Clase II, atenuador hidroneumático de lámina flexible, colector flotante con estructura de referencia fija.

4.5 SEA CLAM

Este sistema, desarrollado por la Sea Energy Associated Ltd. y el Coventry (Lancaster) Polytechnic, tiene su origen en 1978, durante los ensayos de cargas en vigas flotantes realizados para los Ducks y el LFB en el Lago Ness.

El sistema, figura 9, descrito en (11), consta de una gran viga cajón de hormigón pretensado flotante y anclada de manera que pueda ser orientada automáticamente. El eje del cajón debe formar unos 50° con las crestas del oleaje y la longitud de la viga es tal que puede considerarse como referencia fija.

En la cara del cajón que enfrenta el oleaje van montados unos fuelles de caucho, que de manera similar al LFB impulsan y reciben aire del

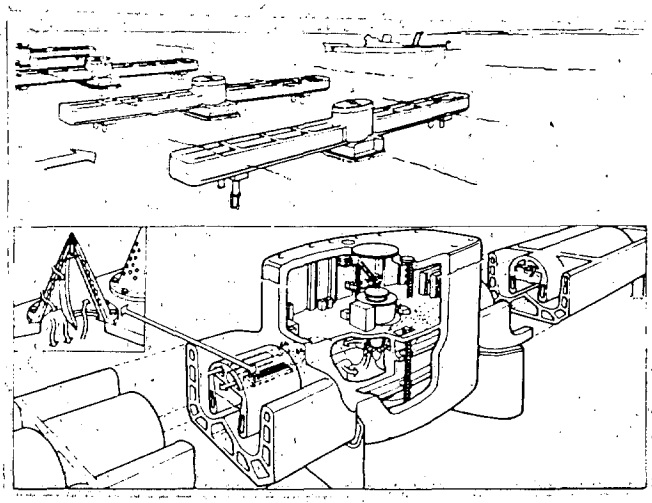


Figura 9.—Vichers OWC atenuador, tomado de Grove-Palmer 1982.

interior de la viga, que está presurizado. En el conducto común de entrada y salida se encuentran los grupos, con turbinas autorrectificadoras, es decir, que giran en el mismo sentido, sea cual sea el sentido del flujo de aire.

El control de la amortiguación, como en el LFB, se consigue a través de variaciones de carga en el alternador y de la presión interior.

Se clasifica como un sistema Clase II, terminador hidroneumático flotante de lámina flexible con estructura de referencia fija.

4.6 VICKERS OWC

Diseñado por la Vickers Engineering Group, pertenece también a la 2.ª generación de sistemas que nace en el Reino Unido con posterioridad al estudio (3) del NEL en 1976. Se describe en (12).

Se proponen dos soluciones, figura 9, atenuador sumergido y terminador, éste último con un pequeño francobordo, ambas fijas al fondo.

El convertidor primario es hidroneumático de cámara abierta, con colección de flujos a sendos conductos presurizados de alta y baja presión de aire. La turbina de aire es axial y conecta ambos conductos.

El control del sistema a través de la presión en los conductos es Clase II, aunque se estudia el control en Clase I mediante la sustitución de las válvulas pasivas de retención por otras activas.

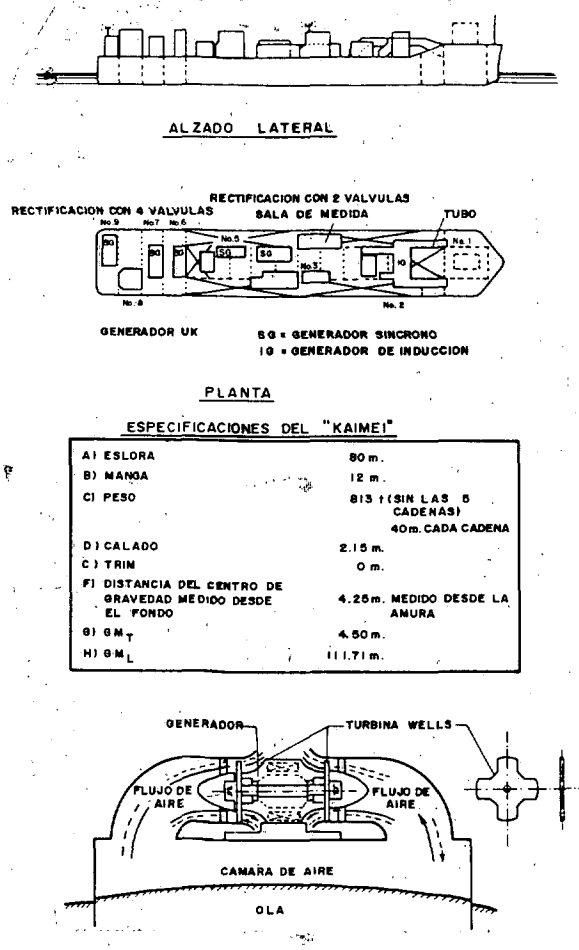


Figura 10.—Kaimei 1982, tomada de Ishii et al 1982.

4.7 El KAIMEI

Diseñado por Yoshio Masura del JAMSTEC en 1974, es un barco, figura 10, de prueba para turbinas de aire, producido por el flujo de las cámaras, abiertas por el fondo de que está provisto. En la actualidad dispone de ocho grupos japoneses, uno del Reino Unido y otro de USA. La potencia instalada total es de 2 MW. La transmisión a tierra se hace mediante cable submarino.

Desde 1979 trabaja en colaboración con la International Energy Agency (IEA), siendo el JAMSTEC el encargado de las pruebas.

Actualmente, se encuentra en marcha un programa de ensayos (13), con término en 1986 que permitirá decidir la forma óptima del sistema flotante, así como elegir el grupo generador. El nuevo prototipo deberá estar construido en 1987.

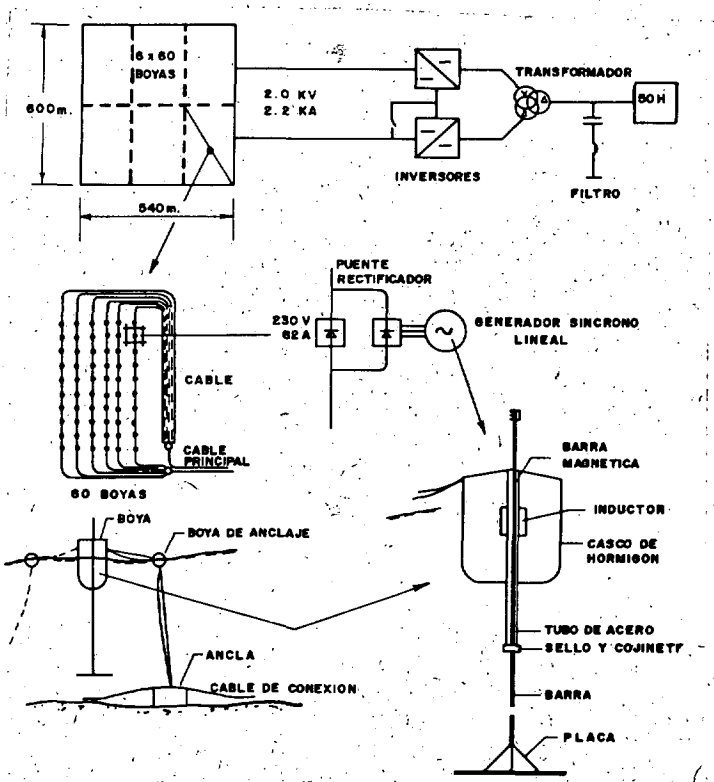


Figura 11.—Planta de boyas suecas, tomada de Bergdahl et al. 1979.

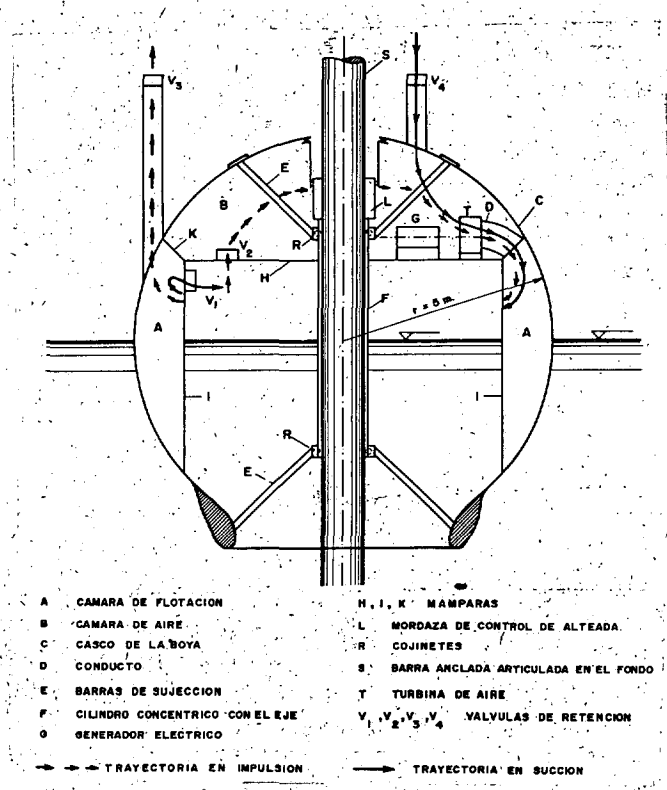


Figura 12.—Boya del programa noruego, tomada de Budal et al. 1982.

Se puede clasificar como Clase II, hidroneumático de cámara abierta atenuador, flotante con estructura de referencia fija y de conversión directa.

4.8 Programas Noruego y Sueco

Excepto algunos intentos en el campo de los terminadores (14), Noruega y Suecia han elegido la vía de los absorbedores puntuales «Point absorbers», en la forma de pequeñas unidades (boyas), con potencias instaladas de 100 a 500 KW cada una y dispuestas en grandes campos, con las salidas unidas eléctricamente.

Los suecos han estado trabajando con apoyo gubernamental del Swedish Board for Energy Source Development (NE) desde 1976 (15). El trabajo noruego se desarrolla en el Norge Tekniske Hogskole en Trondheim (16).

La boya sueca tiene como referencia fija una barra con una placa horizontal sumergida que impide los movimientos en la dirección del eje. La energía se obtiene con un generador lineal acoplado a la barra, figura 11.

La boya noruega es hidroneumática, figura 12, abierta por el fondo. El grupo consta de una turbina de flujo axial rectificado mediante cuatro válvulas.

El campo de boyas para una central de 200 MW constará de 410 boyas, situadas paralelamente a la costa, en 40 m de profundidad y en fajas de cinco en fondo.

4.9 El NEL OWC

En el estudio realizado por el National Maritime Institute (NEL) para el Departamento de Industria del Reino Unido (3), se llegó a la conclusión de que el sistema más prometedor de entre los desarrollados hasta entonces (1975), era un hidroneumático de cámara abierta y conversión directa. El mismo NEL se encargó de su desarrollo.

Los últimos diseños (17), figura 13, apuntan a un rompeolas terminador fijo al fondo, con las cámaras abiertas por el frente y una turbina por cámara.

Los diseñadores se han planteado las posibles ventajas de la colección de los flujos de aire en los conductos. Los ensayos realizados hasta

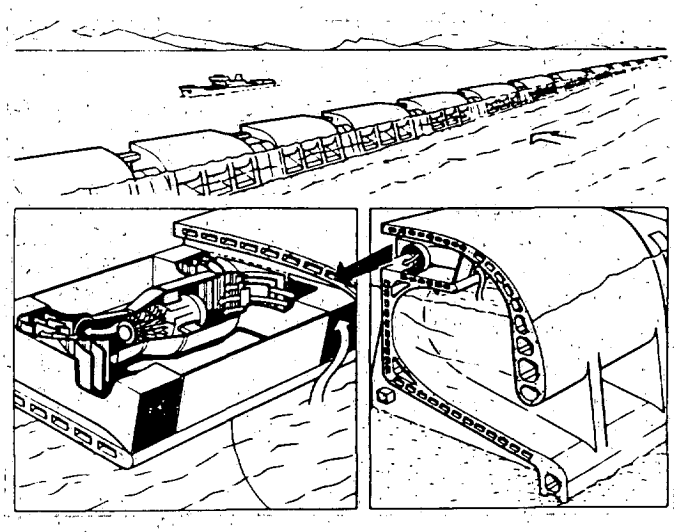


Figura 13.—Rompeolas del OWC, tomado de Grove-Palmer 1982.

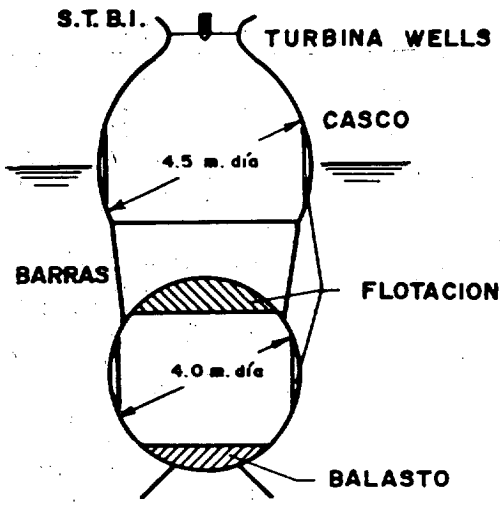


Figura 15.—Boya de la Queens universidad de Belfast, tomada de Long et al. 1978.

ahora revelan que la eficiencia disminuye un 50 por 100 debido principalmente al subreamortiguamiento necesario para impedir la ingestión de agua por las válvuas. Al igual que en el Vickers, se indica la posibilidad de corregir esta disminución mediante la inclusión de unas válvulas de aire activas en la salida de las cámaras que aporten el amortiguamiento necesario en cada caso. De esta manera, se podría conseguir un control en Clase I.

4.10 Otros sistemas

De los sistemas presentados en la Tabla I que no han sido descritos, se puede destacar:

— El HRS Rectifier de R. Russell, formado por un rompeolas terminador con válvulas de retención de agua en su frente que alimentan, al paso de las crestas del oleaje, un depósito interior a mayor nivel que el nivel medio del mar, figura 14. Este desnivel se aprovecha para mover las turbinas, descargándose el flujo a través de otras válvulas, al paso del seno de la ola. Es un sistema de baja eficiencia y con problemas de mantenimiento en las válvulas, pero tiene el interés de evolucionar a partir del primer gran proyecto moderno de aprovechamiento de la energía del oleaje, el de la Isla Mauricio, en el Indico (18), iniciado en 1956. Los últimos diseños (19) proceden de 1978.

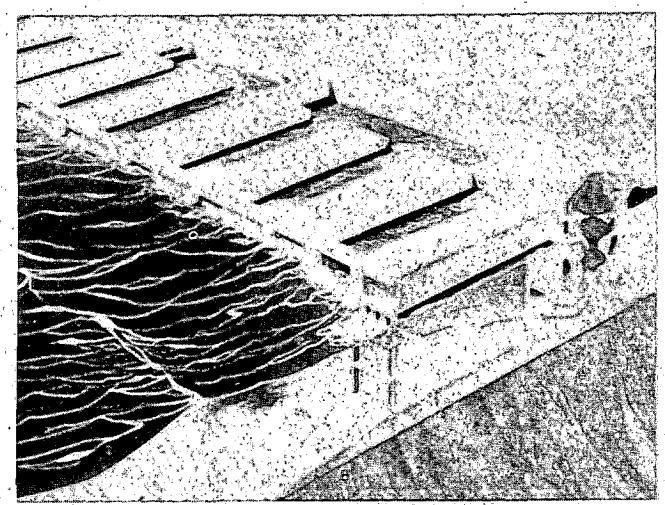


Figura 14.—Rectificador, tomado de Grove-Palmer 1982

— Boya Hidroneumática de la Queen's University of Belfast, primer ingenio hidroneumático que monta la turbina autorrectificadora de álabes simétricos diseñada por Wells. Una boya de 4,5 m diámetro, figura 15, dotada de una turbina de 1.36 m de diámetro, acoplada a un alternador de 45 KW fue anclada en el Mar de Irisch y probada durante dos meses, hasta que una serie de temporales la desmantelaron en la Navidad del 77-78. Los resultados de los ensayos vienen dados en (20).

— El Dam-Atoll, figura 16, diseñado por Less Wirt y descrito en (21). Una gran isla flotante hemisférica concentra el oleaje por refracción en su cúspide, donde rompe. Unos muros convergentes conducen y amplían el flujo en rotura de manera que el nivel medio en la cúspide aumenta. La sobreelevación así obtenida obliga al agua

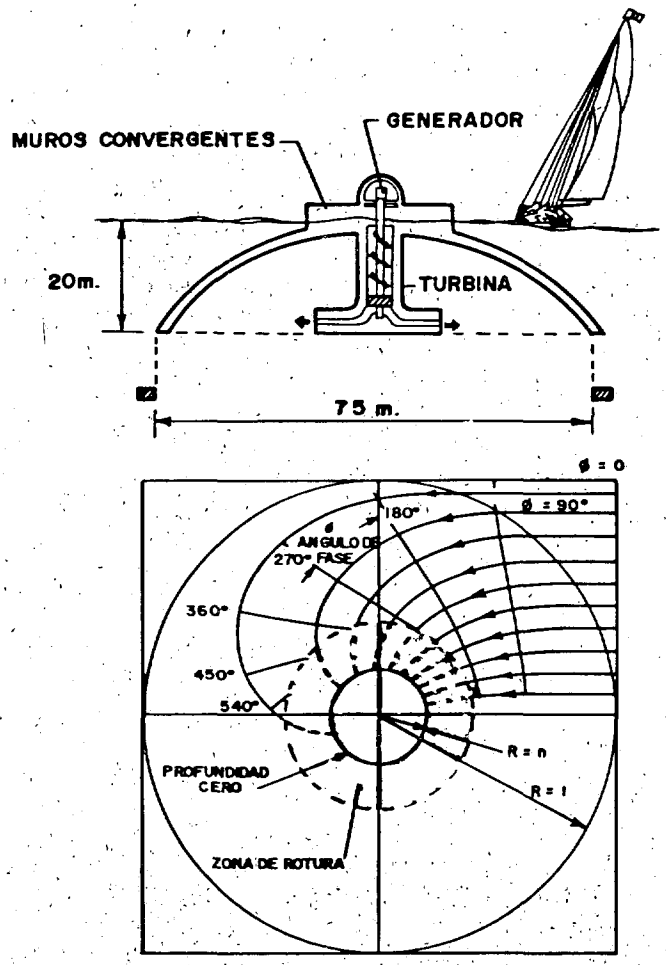


Figura 16. — Dam-Atoll, tomada de Isaacs 1979.

a sumirse a través de un tubo vertical situado en el centro del domo, con un movimiento espiral favorable al funcionamiento de la turbina, situada en su parte inferior.

El resto de los sistemas presentados en la Tabla I y otros no indicados en ella, o repiten los esquemas descritos, o no han sido diseñados para la producción de energía en gran escala, por lo que creemos que los descritos representan bastante bien el panorama actual de los sistemas para el aprovechamiento de la energía del oleaje.

5. SELECCION DE UN SISTEMA

El NEL, en (3), plantea una lista de 17 criterios para la selección de sistema más adecuado. En este trabajo se han agrupado criterios equivalentes, reduciéndose a los de la Tabla II.

Utilizando estos criterios, se analizan los sistemas descritos en el apartado 4. El resumen comparativo se presenta en la Tabla III.

De la observación de la tabla se concluye que el rompeolas fijo hidroneumático del NEL es el más prometedor de todos los sistemas estudiados. Se ha decidido tomar este diseño como punto de partida para posibles mejoras.

TABLA II

CRITERIOS DE SELECCION

I. Eficiencia de Conversión	II. Operación y mantenimiento	III. Factibilidad tecnológica	IV. Otros criterios
1 Eficiencia hidrodinámica primaria.	Componentes expuestos al clima marino.	Necesidad y complejidad del desarrollo de tecnología específica.	Problemas para la navegación y pesca.
2 Eficiencia secundaria.	Grado de concentración de tensiones.	Complejidad de construcción, instalación y operación.	Problemas para la morfología costera y ecología.
3	Capacidad de operación y supervivencia en oleajes extremos.		
4	Necesidad y facilidad de mantemiento y reparación.		

TABLA III

ANALISIS COMPARATIVO

Criterio	I.1 I.2	II.1 II.4	II.2 I.3	III.1 III.2
	Eficiencia Global	Mantenimiento	Fiabilidad	Factibilidad Tecnol. Constr. Operativa
DUCKS	ALTA	BAJO	MEDIA	MUY BAJA
BOC	MUY ALTA	MEDIO	ALTA	BAJA
CLAM	MUY ALTA	MEDIO	MEDIA	ALTA
LFB	MEDIA	MEDIO	MEDIA	ALTA
NEL B/W	MUY ALTA	MEDIO	ALTA	MUY ALTA
VICKERS ATT	MEDIA	BAJO	ALTA	MEDIA
QUB	MEDIA	ALTO	MEDIA	ALTA
BOYAS NORUEGO	MEDIA	ALTO	BAJA	MEDIA
KAIMEI	BAJA	MEDIO	ALTA	MUY ALTA
RHFC	ALTA	BAJO	MUY ALTA	MUY ALTA
RAFTS	MEDIA	MEDIO	MEDIA	ALTA
DAM-ATOLL	BAJA	MEDIO	ALTA	ALTA

6. DESCRIPCION DEL SISTEMA SELECCIONADO

El sistema que se propone deberá tener las siguientes características generales:

a) *Fijo al fondo por gravedad*

Los diseños de NEL, preocupados por la reducción de volumen de la estructura, han conducido a cajones ligeros que es necesario anclar a la roca, preparando el fondo mediante dragado. También el NEL y Vickers plantean apoyos en pilas y contrafuertes.

Se ha considerado que el sistema más sencillo para la obtención de estabilidad es la gravedad, aún a costa de aumentar la sección del cajón, lo que puede ser una ventaja en caso de utilizar el dique como abrigo de un puerto. El apoyo se puede hacer sobre una base granular enrasada a la cota deseada.

b) *Hidroneumático de cámara abierta y reflector*

Los sistemas hidroneumáticos reflectores (NEL, SEA, CLAM) han demostrado tener altas eficiencias, con ligera ventaja para los de cámara cerrada. Sin embargo, las membranas flexibles son puntos débiles del sistema y son complicadas de reponer.

La cámara cerrada permite utilizar el aire en circuito cerrado, lo que abarata los materiales de turbinas y válvulas. Los adelantos logrados en aleaciones y plásticos (PRFV) hacen que la utilización del circuito abierto (atmósfera como compensador), no sea ningún problema.

c) *Control del movimiento de la columna de agua en las cámaras mediante válvulas de paso variable automáticas*

Para que la colección de flujos de aire sea eficiente, es necesario regular la amortiguación en las cámaras mediante válvulas de sección variable automáticas, eléctricas o hidráulicas. Un ordenador procesa la señal del sensor del nivel de agua situado en cada cámara y manda la orden a la válvula correspondiente, de acuerdo con un programa establecido. En caso de fallo del sistema, la válvula deberá quedar cerrada, aislando la cámara correspondiente.

d) *Colección de flujos de aire mediante válvulas de retención a conductos de alta y baja presión*

Las ventajas de la colección de flujos de aire se pueden resumir en:

— Amortiguación de las variaciones del flujo que llega a las turbinas: el frente de onda no es regular ni incide completamente perpendicular al dique, por lo que, en cada momento, las cámaras estarán en posiciones variables, dan-

do un flujo más regular en conjunto cuanto mayor sea la longitud de colección.

— Disminución del número total de grupos y aumento de su potencia. Se mejora el mantenimiento y se concentran los grupos en varias salas.

— En los períodos de baja energía, se pueden tener en funcionamiento sólo aquéllos grupos que sean necesarios para mantenerse en la zona de rendimientos óptimos. El mantenimiento de los grupos se puede hacer sin reducción de la producción. Al separar los grupos de las cámaras, se puede trabajar incluso en temporales, enviando el exceso de aire a la atmósfera o reflejando el oleaje.

e) *Turbinas de alto rendimiento*

Al disponer de un flujo de aire con variación amortiguada y rectificado, se pueden instalar turbinas de aire de alto rendimiento (p. e. Francis) y de mayor potencia unitaria.

f) *Generación síncrona*

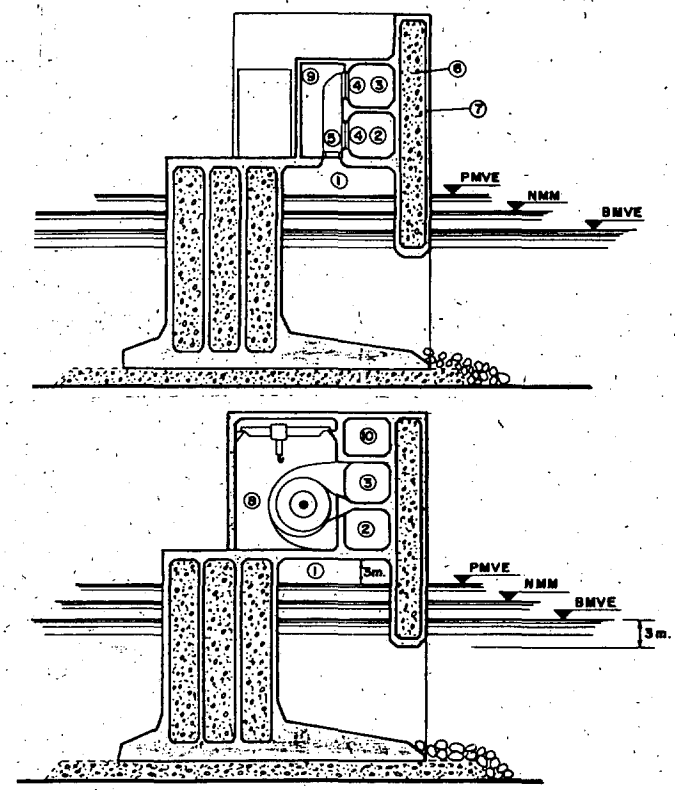
Las variaciones amortiguadas del flujo de aire permiten acomodar la carga del alternador y reguladores de la turbina de manera que se mantenga la velocidad de rotación, pudiéndose generar en sincronía con la red. Las salidas de los alternadores se conectan entre sí y transforman a A. T. como en una central clásica.

g) *Transmisión a tierra en corriente alterna*

Dado que se trabaja en profundidades entre 20 y 30 m, la transmisión a tierra se puede hacer a través del propio dique, submarina, aérea, etc., según los casos. La transformación previa es convencional.

El sistema que se propone, denominado Resonador Hidroneumático Fijo Colector (RHFC), tendría una disposición similar a la indicada a las figuras 17 y 18.

En la figura 18 se presentan dos hipotéticas secciones, por válvulas y por turbinas de un módulo del RHFC. Cada módulo está formado por un cajón de hormigón armado o pretensado de 35 × 60 m² de planta, aligerado de manera que se pueda transportar por flotación. El frente se abre a tres metros por debajo de la bajamar



① CAMARA DE AIRE
② CONDUCTO DE ALTA PRESION
③ CONDUCTO DE BAJA PRESION
④ VALVULAS DE RETENCION
⑤ VALVULA DE PASO
⑥ HORMIGON EN MASA
⑦ HORMIGON ARMADO O PRETENSADO
⑧ SALA DE TURBINAS
⑨ CONDUCTO DE SERVICIO
⑩ SALA DE CONTROL

Figura 17.— Secciones por válvulas (arriba) y por turbinas del sistema propuesto, escala aproximada para el cantabrico. E: 1/500

viva, dando paso a las cámaras, de dimensiones aproximadas 17 m de longitud por 13 de anchura. El techo de la cámara queda 3 m por encima del nivel de la pleamar viva y en él se encuentra el conducto de paso de aire y la válvula de paso regulable.

La superestructura está formada por los conductos de colección de aire, alta y baja presión, que corren a lo largo del módulo y se empalman con los adyacentes mediante juntas elásticas que permitan pequeños desplazamientos relativos entre módulos y garanticen la estanqueidad al aire. La sección de los conductos es de unos 25 m².

La acometida entre la válvula de paso de la cámara y los conductos de alta y baja presión se hace mediante un solo conductor de PRFV. Las válvulas de retención se sitúan en las paredes de los conductos colectores respectivos.

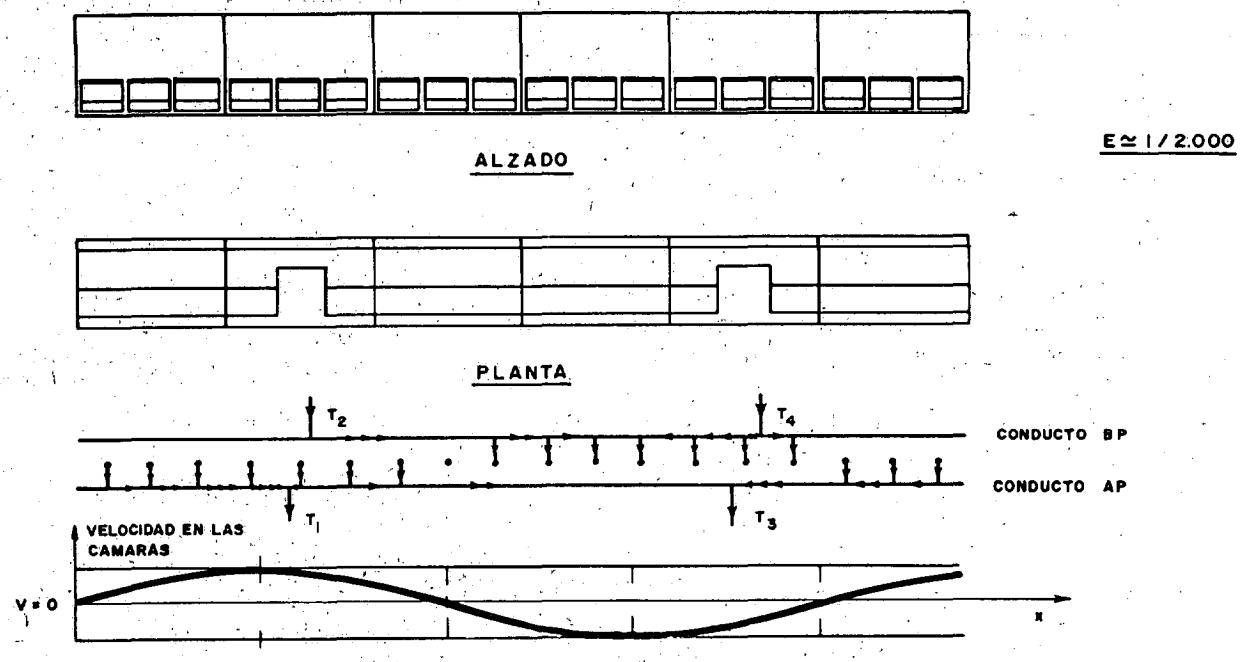


Figura 18.—Alzado y planta de un rompeolas RHFC con dos grupos y 6 MW instalados, diagrama de flujos de aire en una hipótesis de funcionamiento.

Tanto las válvulas de retención como la de paso llevarán una compuerta que permitirá su aislamiento para mantenimiento sin afectar el funcionamiento de la central. Los materiales de las válvulas, turbinas y soportes expuestos deberán ser resistentes a la corrosión salina.

El conjunto de válvulas, tubos, motores de accionamiento, conducciones eléctricas, etc., va situado en un sala que corre a lo largo de todo el módulo, interrumpiéndose sólo en las salas de grupos, desde donde se accede a este conducto de mantenimiento. En principio, se prevé un módulo con turbinas entre cada dos sin ellas.

La sala de turbinas se sitúa en el centro del módulo. Dispone de dos turbinas, una para cada conducto, con toma y descarga atmosférica. Se puede acoplar en tandem a un solo eje acoplado a un alternador sincrono. La potencia instalada sería unos 3000 KW, es decir, unos 17 KW/m rompeolas. En la sala se dispondrá de un centro de control del sistema.

En la figura 18 se representa una central RHFC compuesta de seis módulos (360 m) y 6 MW instalados en dos salas. En la parte inferior de la figura se esquematizan los flujos de aire en una hipótesis de funcionamiento.

En la misma sala de turbinas se procederá a transformar a media o alta tensión. Las conducciones eléctricas irán protegidas por el interior de los conductos de mantenimiento de las válvulas.

7. CONCLUSIONES

Previa descripción y clasificación de los sistemas para el aprovechamiento de la energía del oleaje, se ha procedido a seleccionar el más adecuado para su aplicación en las costas del N y NO.

El sistema seleccionado es un rompeolas hidroneumático terminador de cámara abierta por el frente, con colección de flujos de aire en conductos de alta y baja presión a través de válvulas de retención. El control es en Clase I, mediante válvulas activas de paso de aire controladas por un programa alimentado por la señal de los sensores de nivel interior de las cámaras. Las turbinas de aire se disponen entre los conductos de aire y la atmósfera, en tándem de dos sobre un alternador sincrono.

Esta disposición supone una mejora sobre el diseño del NEL, Tabla III, en mantenimiento y fiabilidad, perdiéndose posiblemente en rendi-

miento total debido a las pérdidas en la colección (válvulas y conductos).

Este sistema puede formar parte del abrigo exterior a un puerto, lo que haría posible su rentabilidad, al cargar al puerto el coste de la infraestructura, similar a la de un dique vertical.

REFERENCIAS

1. Vidal, C. Análisis de la energía del oleaje en las costas españolas. Revista de Obras Públicas. Pdte. de publicación.
2. Ross, D., 1979. Energy from the waves. Pergamon Press.
3. Leishman, J. M. and Scobie, G., 1976. The Development of Wave Power. A Techno-Economic Study. National Engineering Laboratory. East Kilbride Glasgow, Scotland, U. K.
4. Mc Cormick, M. E., 1981. Ocean Wave Energy Conversion. Wiley. Interscience.
5. Romero, E., Rodríguez, A., Royo, J. A., López, J. J., 1981. Proyecto Geomar. Centro de Estudios de la Energía. Departamento de Investigación y Nuevas Fuentes. Madrid.
6. Salter, S. H., 1982. The Use of Gyros as a Reference Frame in a Wave Energy Converter. 2nd Symp. on Wave Energy Utilization. The Norwegian Institute of Technology. Trondheim. Norway.
7. Cockerell, C. et al., 1978. The Development of the Wave-Contouring Raft. Proc. of the Wave Energy Conference. Energy Technology Support Unit, Harwell, U. K.
8. Olgivie, T. F., 1953. 1st and 2nd Order Forces on a Cylinder Submerged Under a Free Surface. Journal of Fluid Mechanics, 16, pp. 451-472.
9. Evans, D. V., 1978. The Submerged Cylinder Wave Device. Proc. of the Wave Energy Conference. ETSU. Harwell, U. K.
10. French, M. J., 1979. The Search for Low Cost Wave Energy and the Flexible Bag Device. 1st Symp. on Wave Energy Utilization. Chalmers University. Gottenburg. Sweden.
11. Bellamy, N. W., 1982. Development of the Sea Clam Wave Energy Converter. 2nd Symp. on Wave Energy Utilization. The Norwegian Institute of Technology. Trondheim. Norway.
12. Drew, S. D., 1982. Recent Developments with Vickers OWC Devices. Proc. of 2nd Symp. on Wave Energy Utilization. Norwegian Institute of Technology. Trondheim. Norway.
13. Ishii et al., 1982. Reports and Future Plans for the KAIMEI Project. Proc. of the 2nd Symp. on Wave Energy Utilization. Norwegian Institute of Technology. Trondheim. Norway.
14. Törnkvist, R., 1979. Computer-Controlled Power fron Irregular Ocean Waves. Proc. of 1st Symp. on Wave Energy Utilization. Gottenburg. Sweden.
15. Bergdahl, L. et al., 1979. The Swedish Wave Energy Research Programme. Proc. of 1st Symp. on Wave Energy Utilization. Gottenburg. Sweden.
16. Budal, K. et al., 1982. The Norwegian Wave Power Buoy Project. Proc. of 2nd Symp. on Wave Energy Utilization. The Norwegian Institute of Technology. Trondheim. Norway.
17. Moody, G. W. and Elliot, G., 1982. The Development of the NEL Breakwater Wave Energy Converter. Porc. of 2nd Symp. on Wave Energy Utilization. The Norwegian Institute of Technology. Trondheim.
18. Walton, A. N. et al., 1978. The Maurituis Wave Energy Project. 1st Symp. on Wave and Tidal Energy. Canterbury. England. U. K.
19. Rance, P. I., 1978. The Development of the HRS Rectifier. Proc. of Wave Energy Conference. ETSU. Harwell, U. K.
20. Whittaker, T. and Wells, A., 1978. Experiences with a Hydropneumatic Wave Power Device. 1st Symp. on Wave and Tidal Energy. Canterbury. England.
21. Isaacs, J. D., 1979. Ideas and Some Development of Wave Power Conversion, Dynamic Absorption an Deep Sea Mooring. 1st Symp. on Wave Energy Utilization. Chalmers University of Technology. Gottenburg. Sweden.

César Vidal Pascual

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Santander en junio de 1979. En septiembre de 1979 pasa a formar parte, como becario, del Equipo del Departamento de Puertos de la citada escuela, obteniendo en Enero de 1980 la Beca para la Formación del Personal Investigador. En septiembre de 1981 es contratado como Profesor Ayudante y en 1983 obtiene el contrato de Profesor Colaborador de la Universidad de Santander. Doctor Ingeniero de Caminos en junio de 1984 con la Tesis Doctoral: Estudio de las disponibilidades de energía del oleaje en el mar Cantábrico, selección y análisis en modelo matemático y físico de un sistema rompeolas hidroneumático fijo colector para el aprovechamiento de la energía del oleaje, dirigida por don Miguel Angel Corniero Lera. Ha participado en varios trabajos de Investigación del Departamento de Puertos y en la actualidad se encuentra realizando un Trabajo de Investigación sobre la influencia de la geometría de los morros de los diques en su estabilidad y en la agitación interior de la dársena, para la Dirección General de Puertos.