

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**" CONVERSION DE ENERGIA DEL OLEAJE; DISEÑO,
USOS Y APLICACIONES "**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO
DE
OCEANOLOGO
PRESENTA:
HECTOR S. RIVAS
CACERES

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA.

JUNIO DE 1992.

RESUMEN

Se llevó a cabo la construcción y prueba a nivel experimental de un modelo físico que convierte la energía de las olas en energía mecánica y eléctrica. Se analizó la eficiencia del sistema convertidor al variar su posición relativa con respecto al canal y ante diferentes condiciones de ondas. La máxima eficiencia lograda por el sistema fue de 15%, es decir, del total de la energía que tienen las ondas antes de llegar al sistema, se logra transformar 15% en electricidad, del 85% restante una parte continua propagándose con las ondas y otra es perdida por la fricción de las partes componentes del sistema.

**"CONVERSION DE ENERGIA DEL OLEAJE;
DISEÑO, USOS Y APLICACIONES"**

**TESIS
QUE PRESENTA:**

HECTOR S. RIVAS CACERES

APROBADA POR:



**PRESIDENTE DEL JURADO
MC. OSCAR DELGADO GONZALEZ**


**SINODAL PROPIETARIO
MC. LUIS FELIPE NAVARRO OLACHE**


**SINODAL PROPIETARIO
OC. ASDRUBAL MARTINEZ DIAZ DE LEON**

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

DR. HECTOR RIVAS CONTRERAS
NOEMI CACERES MENDEZ

Cariño, Generosidad, Animo, Ejemplo, Confianza, Todo.
GRACIAS.

HERMANOS:

RAYMUNDO RIVAS CACERES
NOE RIVAS CACERES

Y ABUELOS:

DON SALVADOR RIVAS ARAIZA (Q.E.P.D.)
- Sigo con las " Ciencias Marítimas..."

RENE MENDEZ Vda. DE CACERES
Gracias por sus oraciones.

A LA MECHUDA (MERCEDES OCHOA VIZCARRA)

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Investigaciones Oceanológicas y la Universidad Autónoma de Baja California por el apoyo otorgado para el desarrollo de este trabajo, por el acceso a laboratorios, taller, e instrumentación.

En especial a mi director MC. Oscar Delgado González, por las críticas y recomendaciones, por el interés en mi trabajo desde sus inicios y su ayuda en todo.

A mis sinodales MC. Luis Felipe Navarro Olache y Oc. Asdrubal Martínez Díaz de León, por sus valiosas sugerencias.

MC. Francisco Suarez Vidal, por su orientación. En su clase nació la idea.

MC. Héctor Bustos Serrano.

Oc. Gilberto Velázquez A. por su desinteresada ayuda de siempre.

Oc. Eduardo Gil Silva, Oc. Sergio Larios Castillo y Oc. Rafael Blanco B., por su buen trato durante mi estancia como servicio social y tesista en el laboratorio de Oceanografía física del I.I.O.; Por aguantar el ruido !

T.E Feliciano Dominguez P., por su paciencia y ayuda con los volts, watts, amperes, ohms, etc.

Mis compañeros de área: Daleth, Adriana, Ixchel, Pablo y El Compadre. Los de Generación, los ÑOKIS

A mis tíos y primos, a los compadres Cachis y Chita

A la Familia González Castillo.

A todas aquellas personas que de alguna manera forman parte de este trabajo, gracias por los comentarios, ideas y sugerencias.

CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS.	ii
LISTA DE FIGURAS.	iii
1 INTRODUCCION.	1
2 OBJETIVO.	6
3 ANTECEDENTES.	7
4 MATERIALES Y METODOLOGIA.	13
4.1 EN TALLER.	13
4.2 EN LABORATORIO.	14
5 RESULTADOS.	23
5.1 FUNCIONAMIENTO DEL MODELO.	23
5.2 EFICIENCIA DEL MODELO.	32
6 DISCUSIONES.	34
7 CONCLUSIONES.	37
8 LITERATURA CITADA	38
9 APENDICE A	43
10 APENDICE B	47
11 APENDICE C	51

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
I r.p.m. desarrolladas por la rueda del convertidor para la altura del aparato 1.	24
II Igual a I (r.p.m.) para la altura de aparato 2.	24
III Igual a I (r.p.m.) para la altura de aparato 3.	25
IV Igual a I (r.p.m.) para la altura de aparato 4.	25
V Igual a I (r.p.m.) para la altura de aparato 5.	25
VI Alturas de ola y períodos obtenidos al variar la velocidad del motor y la amplitud de la paleta para la columna de agua de 20 cm.	28
VII Igual a VI (alturas y períodos obtenidos) para $h = 25$ cm.	28
VIII Igual a VI (alturas y períodos obtenidos) para $h = 30$ cm.	29
IX Igual a VI (alturas y períodos obtenidos) para $h = 35$ cm.	29
X Igual a VI (alturas y períodos obtenidos) para $h = 37.5$ cm.	30
XI Valores de potencia para cada altura de ola antes y después de pasar por el convertidor durante el experimento de eficiencia	32
XII Valores de voltaje y potencia arrojados por el convertidor asociados a las diferentes alturas de ola.	32
XIII Valores de potencia perdida por la ola al pasar por el convertidor, eficiencia eléctrica, eficiencia de extracción y pérdida por fricción, asociados a las correspondientes alturas de ola.	33
XIV Número de revoluciones que cada engrane desarrolla cuando E1 gira 1 vuelta.	49

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Modelo de convertidor directo.	17
2 Amplitud del brazo generador de ondas.	17
3 Control de velocidades, motor generador de ondas.	17
4 Caracterización del dinamo.	17
5 Diagrama de conexión de instrumentos de medición utilizados para la caracterización del dinamo.	18
6 Caracterización del dinamo (voltaje).	18
7 Caracterización del dinamo (potencia).	19
8 Comportamiento del convertidor (r.p.m.) para 5 alturas del aparato en respuesta a la variación del contrapeso del flotador y la profundidad de agua en el canal de ondas.	27
9 Curva de calibración utilizada para regular las características del oleaje a utilizar para el análisis de eficiencia.	31
10 Comportamiento de la eficiencia en función de la variación de las alturas de ola cuando el período es de 1.14 s.	33
11 Consumo de energía estimado para el año 2000.	44
12 Producción mundial de petróleo, producción acumulativa y descubrimientos.	44

13	Porcentaje de suministro de energía que cubrían para 1979 las fuentes convencionales y lo que se prevee para el año 2000.	45
14	Mecanismo de magnificación de movimiento.	47
15	Movimiento del sistema mecánico cuando el flotador sube.	49
16	Movimiento del sistema mecánico cuando el flotador baja.	49
17	Distribución latitudinal de potencia del oleaje.	60
18	Distribución de la energía del oleaje a lo largo de las líneas de costa del mundo.	61

1 INTRODUCCION.

Dos tercios de la superficie terrestre están cubiertos por el océano, y mientras la población mundial se incrementa, aumenta también el interés por aprovechar al máximo su potencial de alimentos y energía (Masuda y Miyazakit, 1978).

La energía en la naturaleza procede principalmente de 3 fuentes: del sol, a través de energía radiante; de la marea, mediante desplazamientos de enormes volúmenes de agua oceánica y por último la geotérmica, con energía calorífica proveniente del interior de la tierra (Skinner & Turekian, 1976).

Los océanos actúan como sistemas colectores y de almacenamiento de energía solar, reteniendo aproximadamente un 72% de la que llega a la tierra y este hecho se manifiesta en varias formas de movimiento (Ross, 1978). Sus recursos energéticos se presentan a través de algunos fenómenos oceánicos, dentro de los cuales destacan las mareas y sus corrientes, las corrientes oceánicas, las olas, las diferencias de temperatura, las sustancias químicas disueltas, la acción osmótica entre el agua de mar y el agua dulce, los gradientes de salinidad y la biomasa. En este contexto, no existe duda de que la energía del océano es un concepto real y prometedor, pues puede llegar a constituir un complemento efectivo a las actuales fuentes de energía. En teoría todas ellas podrían utilizarse, pero sólo la procedente de la marea se emplea a gran escala; esto a pesar de que la energía del oleaje es 16 veces mayor (Kinsman, 1965), más las posibilidades de dominar y utilizar la energía de las olas, parecen tan escasas como lo indicaron Skinner y Turekian en 1976.

Uno de los más espectaculares efectos que ocurren en los océanos es el oleaje, fenómeno natural que atrae la atención de cualquier observador (Delgado, 1988); algunas olas se han reportado hasta con 34 metros de altura (Panicker, 1977). La fuerza debida a éste, es familiar para cualquiera que viva cerca de la costa y su potencia es conocida por los

destrozos que ha causado. Existen numerosos testimonios acerca de olas que han provocado serios daños, entre los cuales podemos mencionar, como caso clásico, las olas que llegan al rompeolas Wick, en Escocia, donde un bloque de rocas cementadas con peso mayor a 1350 toneladas fué fracturado y removido por la acción del oleaje. Cinco años después se reemplazó con rocas que sumaban en peso unas 2600 toneladas: fue nuevamente destruido. La presión que ejercen las olas rompiendo a lo largo de esta costa ha sido actualmente medida en unos $30,000 \text{ Kg/m}^2$ (Panicker, 1977).

En particular, la costa Oeste de la península de Baja California, México, está expuesta a oleaje que puede producir serios daños. En la Bahía Todos Santos es frecuente que las olas rebasen el rompeolas durante los meses de invierno causando incluso en ocasiones serios daños a la estructura del mismo así como el que los propietarios de casas - habitación en la zona costera se vean afectados por el oleaje (Delgado, 1988). Para esta zona en específico, se considera como oleaje bajo a olas de .5 m de altura, de 2.5 m como oleaje medio y de 4 m como oleaje alto en condiciones de tormenta de invierno, alcanzando en casos extremos hasta los 7 m de altura.

Las olas son una forma concentrada de energía solar, ya que son generadas por el viento y la fuente primaria de energía de éste es el sol. La razón de captación de energía solar por las olas a través del viento, es de especial importancia, ya que ésta es directamente la razón de renovación de energía del oleaje. A pesar de que un cálculo detallado de esta razón podría resultar difícil, Panicker en 1977 propone un razonamiento mediante el cual es posible obtener una estimación aproximada del orden de magnitud de la misma: menciona que la fracción de energía del sol que se convierte en viento se estima en 1.5% de acuerdo a Heronemus, 1974 (citado por Panicker 1977). Si se asigna arbitrariamente un 1% de la energía del viento a las olas, se podría obtener una estimación dentro de 2 ordenes de magnitud.

Usando 111.7×10^{15} Watts como la potencia total del sol que arriba a la tierra, la entrada de potencia hacia las olas se estimaría en 17×10^{12} W. Para la obtención del orden

de magnitud de la razón de transferencia de potencia del viento a las olas, se podría calcular el esfuerzo tangencial en la superficie del océano y multiplicarlo por la celeridad de las olas; así, suponiendo una velocidad del viento de 5 ms^{-1} , un coeficiente de arrastre de 1.29×10^{-3} y una densidad del aire de 1.1 Kg m^{-3} , el promedio de esfuerzo tangencial en la superficie del océano sería $3.55 \times 10^{-2} \text{ Pa}$. Con un área oceánica de $361.059 \times 10^{12} \text{ m}^2$, la potencia total transferida al océano por el viento puede estimarse para olas de 6 s como $60 \times 10^{12} \text{ W}$.

Si se considera la razón de disipación de energía de las olas a lo largo de las líneas de costa del mundo, suponiendo un promedio global de alturas de ola de un metro y un período de 8 s, así como condiciones de aguas profundas y considerando la longitud total de todas las líneas de costa del mundo como 336,123 Km, la potencia total a lo largo de las líneas de costa mundiales resulta ser de $2.6 \times 10^{12} \text{ W}$. Esto comparado con la estimación de $2.2 \times 10^{12} \text{ W}$ de Kinsman (1965) y $2.5 \times 10^{12} \text{ W}$ de Issacs y Seymour, 1973 (citados por Panicker 1977), nos lleva a ver que el acercamiento es bastante válido.

La razón de transferencia de energía del viento a las olas debe ser mayor que la razón de disipación de energía a lo largo de las líneas de costa, ya que parte de la energía de las olas es disipada antes de llegar a las costas. Considerando lo anterior, y comparando las estimaciones obtenidas, Panicker (1977) concluye que es razonable que la potencia total de las olas se renueve a una razón de entre 10^{12} y 10^{13} W que por coincidencia es cercana a la razón de consumo de potencia por parte del hombre para 1977.

Del razonamiento de Panicker se puede suponer con bases más sólidas al oleaje como un recurso natural marino altamente renovable al cual el hombre ha buscado encontrar diversas ventajas.

En particular, una de las más notables características de la variada fisiografía de México son los 10,000 Km de longitud de su zona costera bordeando 4 cuerpos de agua

importantes, el Océano Pacífico, el Golfo de California, el Golfo de México y el Mar Caribe (Lankford, 1977). Kinsman (1965) expresa la potencia del oleaje por unidad de frente de onda para condiciones de aguas profundas como:

$$P = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T, \quad (1)$$

con esa extensión de litorales y considerando que el oleaje en costas Mexicanas tuviese una altura promedio de 1 m y un período de 10 s, empleando la ecuación (1), se tendría que a nuestros litorales arriban 9.57×10^{10} W y específicamente para la costa oeste de Baja California, cuya longitud, de acuerdo a Silvestre y Zorrilla (1986), es de 720 Km y considerando las mismas condiciones promedio de oleaje, se tendría que esta zona recibe una potencia de 6.89×10^9 W, lo que equivale a 1.6536×10^8 KWh diarios. Una familia promedio consume alrededor de 5 KWh al día; si consideramos la instalación de un convertidor de energía del oleaje cuya eficiencia de conversión fuera de 20%, tenemos que la cantidad de energía que se podría obtener de la costa Oeste de Baja California, bastaría para suministrar energía a más de 6.5 millones de familias. Aunque construir un sistema de conversión de tal longitud es irreal, el ejemplo hace notar el gran potencial de nuestras costas.

Durante los últimos años, una gran cantidad de datos tanto visuales como instrumentales han sido colectados y hoy en día es posible tener estimaciones del contenido de energía en el oleaje marino, sus características y distribución (Constans 1979).

El presente trabajo enfoca su atención en la extracción de energía del oleaje, teniendo como justificación el hecho de que en forma general se sufrirá un gran déficit energético por parte de fuentes convencionales (Apéndice A) y el conocimiento del gran potencial que en este sentido el oleaje posee.

La estructura del texto, luego de la presente sección introductiva al tema, es seguida

por el objetivo. En la sección 3 se hace mención de los trabajos relacionados con el tema, los cuales forman parte de las bases del presente estudio; le sigue después la explicación de los pasos que se siguieron durante el desarrollo tanto de la construcción del modelo de convertidor como de los experimentos llevados a cabo en el laboratorio e instrumentos, materiales y/o herramientas usados (sección 4). La sección 5 contiene los resultados arrojados de la prueba y análisis de eficiencia hechos al aparato los cuales son discutidos y criticados en la sección 6. El texto finaliza con la presentación de las conclusiones a que se llega, añadiendo en forma adicional 3 apéndices; el apéndice A complementa la información referente a la crisis energética por la que el mundo atravieza y las perspectivas a futuro; en el apéndice B se describe a detalle el funcionamiento del modelo fabricado y en el último apéndice se analizan y discuten los posibles usos y aplicaciones que la bibliografía menciona para este tipo de dispositivos, así como las consideraciones para su instalación, discutiendo las ventajas y desventajas que este tipo de aparatos presenta a lado de las fuentes energéticas convencionales.

2 OBJETIVO.

Fabricar un modelo físico que permita comprobar la posibilidad de convertir la energía del oleaje en energía mecánica y eléctrica a nivel experimental en el canal de ondas del laboratorio de oceanografía física de la Universidad Autónoma de Baja California (U.A.B.C.). Analizar su eficiencia y proponer posibles usos o aplicaciones

3 ANTECEDENTES.

"El movimiento sucesivo y desigual de las olas que, luego de haberse elevado como montaña, y caer totalmente en el instante siguiente, tiene la capacidad de sostener en su movimiento a todos los cuerpos que sobre él flotan. La enorme masa de un barco, para la cual no existe otra fuerza capaz de levantarla, responde a los más sutiles movimientos del oleaje. Si por un momento uno imagina este barco suspendido al final de una palanca, se acaba de concebir la idea de la máquina más poderosa que haya existido en todos los tiempos...."

Estas palabras fueron escritas originalmente en el idioma Francés, el 2 de Julio de 1799, y forman parte de lo que sería la primer patente en todos los tiempos de un aparato de obtención de energía del oleaje por los Sres. Girard (Padre e hijo) en Paris (Ross, 1980).

En 1898, P. Wright (citado por McCormick, 1981) patentó un aparato que aprovecha el alza y baja de las olas accionando un brazo que a su vez bombea líquido a un sistema hidráulico que hace girar un dinamo. Para 1820, Bouchaux (Francés citado por McCormick, 1981) diseña otro convertidor cuyo principio se basa en la compresión de aire a partir tanto de la presión del oleaje, como del subir de la marea, usando el aire comprimido para mover un abanico que a su vez se conecta a un dinamo.

De acuerdo a Constans (1979) son principalmente 3 las categorías de fenómenos, relacionados con el oleaje, que pueden ser utilizados para los sistemas de conversión:

- i.- Variación en la altura o pendiente de la ola.
- ii.- Movimiento de las partículas por debajo de la superficie.
- iii.- Transformación de la ola cuando se aproxima a zonas poco profundas.

La conversión de energía del oleaje ha sido, entre las marinas, la fuente más atendida por los inventores. Muchos han sido los esfuerzos con el fin de recuperar esta energía y un gran número de sistemas han sido objeto de pruebas costosas, mas la magnitud del recurso justifica esta actividad (Brin, 1981).

Al paso de los años, para 1981 se contaba ya con más de 1000 técnicas patentadas para la conversión de energía del oleaje entre Japón, Norteamérica, Oeste de Europa y la Gran Bretaña. Sin embargo, la mayoría de estos diseños son simplemente variaciones de unas cuantas ideas básicas en las cuales, según McCormick (1981) se incluyen:

a) **Cuerpos pesados en movimiento:** utilizando el alza y baja de la ola para producir movimiento mecánico. En esta categoría se incluyen los que funcionan con boyas o algún otro tipo de flotadores para accionar el mecanismo y los de "cuerpos deformables" que adoptan la morfología de la cambiante superficie rugosa del mar en cierta área, entre otros.

b) **Resonadores huecos:** basados en la compresión de aire dentro de depósitos huecos mediante una combinación de válvulas de entrada y salida. Aquí entran los de pistones y los sistemas con reservorios de presión.

c) **Aparatos de presión:** su principio es la utilización de la variación de presión hidrostática de fondo al paso de las olas, actuando como bombas hidráulicas que accionan turbinas.

d) **Convertidores de oleaje tipo surging:** basados en el movimiento horizontal de las partículas en aguas someras. En sí, son receptores del golpe de la ola al romper moviendo una especie de pistón el cual acciona un sistema hidráulico.

e) **Convertidores de partículas en movimiento:** se basa en el patrón que las partículas siguen al paso de una onda (movimiento circular - elíptico) para hacer girar aspas y a su vez lo

que sería propiamente el generador. Aquí se incluyen todos aquellos accionados por paletas, veletas u otras estructuras oscilatorias.

El primer gran esquema, ya en este siglo, propuesto por Walton Bott (citado por Ross, 1980), consistió en una planta que produciría toda la potencia necesaria para sostener una población de 800,000 personas que habitaban la Isla de Mauritius en el Océano Indico, de sólo 2,000 Km² (una de las áreas más densamente pobladas del mundo). Allí no hay combustible y pudieron ser los primeros en gozar a gran escala de la energía extraída del oleaje de no ser por que en 1966 se decidió abandonar el proyecto dado que el precio mundial del petróleo se desplomó y resultaba más barato importar el hidrocarburo del Golfo Pérsico que construir la planta.

Algunos países, especialmente Gran Bretaña y Japón, son más optimistas acerca de esto. Ambos países han invertido varios millones de dólares en apoyo al estudio de tecnología en este campo (Ross, 1978).

Salter (1974), muestra el funcionamiento de su modelo de convertidor conocido como "Salter's Duck" el cual en la actualidad sigue siendo uno de los diseños más eficientes y prometedores alcanzando hasta un 90% de eficiencia en condiciones controladas de laboratorio. Menciona que unos cuantos cientos de kilómetros instalados con su convertidor podrían cubrir la demanda total de energía eléctrica de Inglaterra para esa fecha.

En 1979, Masuda presenta los resultados de la prueba del "Kaimei", aparato de 80m de longitud, 12m de ancho y 500 toneladas de peso, durante el período de 1978 a 1979, siendo este un modelo ya a escala real el cual cuenta con 2 cámaras de flotabilidad y 22 compartimientos de compresión de aire, cuyas salidas se unen para dar movimiento a un turbogenerador. Dicho aparato fué diseñado para alcanzar su eficiencia máxima con olas de 6 s de período y 60m de longitud de onda. La potencia obtenida durante el año bajo condiciones de oleaje alto (ver sección 1) fluctua entre 80 y 150 KW; entre 50 y 80 KW con oleaje medio y de 20 a 40 KW en condiciones de oleaje bajo.

El mismo Masuda (1985), habla de sus experiencias durante el desarrollo y prueba de 5 aparatos que utilizan distintos principios de extracción: El tipo "cuerpos deformables" de 15m de longitud que alcanza a generar 200 W en condiciones de oleaje alto; 2 mecanismos útiles de cargado de baterías, que proporcionan energía a boyas luminosas que son auxiliares en la navegación, diseño que es aplicado en la actualidad y si bien sólo proporciona 60 W de salida, se están utilizando aproximadamente 600 sistemas de este tipo no sólo en Japón sino en todo el mundo; el "Kaimai" que es el más brillante y eficiente de sus diseños que alcanza a producir hasta 150 KW (mencionado con más detalle en la cita anterior) y por último un generador de potencia fijo a la costa el cual funciona mediante cámaras de aire (que el oleaje comprime) las cuales tienen como base rocas naturales de la costa en un área de 5 x 8m y que por medio de 2 turbinas alcanza a producir 40 KW.

Higgins (1979) propone el uso de su convertidor "Dam-Atoll" el cual capta la energía del oleaje tanto en dirección vertical como horizontal, concentrandola por medio de refracción hacia un núcleo central que actúa como volante del cual la energía es gradual y continuamente retomada por una turbina que a su vez, al accionar el generador eléctrico, produce una salida nominal para un Dam-Atoll de 100m de diámetro por el orden de entre 1 y 2 Megawatts, dependiendo de la energía del oleaje entrante. Entre sus atributos se encuentran el que no requiere de ser orientado además de responder eficientemente a oleaje aleatorio. Tiene una eficiencia de entre 25 y 45%.

Bellami (1985), describe su diseño de conversión llamado "Circular Clam", que se calcula produce un promedio anual de potencia de 1,200 KW y una salida anual de 5.2 Gigawatts/hora con una eficiencia de turbogenerador de 65%. Su ventaja es el relativo bajo costo y la simplicidad de su estructura, además de no requerir ser orientados, lo cual equivale a capturar energía independientemente de la alineación que adopte.

En los diseños mencionados hasta el momento, el objetivo es el obtener a fin de cuentas energía eléctrica, mas no es éste el único fin en la utilización del oleaje; Pleass (1978), describe el concepto y las consideraciones ingenieriles en el uso de bombas a alta

presión de agua salada, cuya fuerza es obtenida de la energía misma de las olas, para su conversión en agua potable mediante el método de ósmosis inversa. Por otro lado, Miyazaki (1987) propone un esquema para generación de calor usando energía del oleaje y Hotta (1987), hace un estudio que considera el uso de la energía del oleaje para un sistema de recuperación de uranio del agua de mar (ambos citados por Korde, 1990).

También, en un reciente estudio se propone el desarrollar sistemas a mediana escala creando otra posible aplicación para la utilización del oleaje. El aparato extrae la energía por medio de conductores de cobre alrededor de él y colocando magnetos permanentes en la armadura que lo rodea. El campo eléctrico generado entre los 2 polos de la bobina conductora es luego usado para producir una descarga en una cavidad con gas, excitando y apoyando el efecto laser cuando el gas fluye a través de la cavidad que contiene bióxido de carbono y helio en determinadas proporciones. El laser de alta potencia que se obtiene, podría ser usado para sistemas de comunicación tanto subacuáticos como a través de la atmósfera, así como para la propulsión de astronaves (Korde, 1990).

Los convertidores de energía del oleaje pueden proveer una amplia zona de calma detrás de ellos. Esta es justamente la función de los rompeolas. Un estudio al respecto fué hecho en el Instituto Portland Harbour Research con la idea de elaborar un nuevo rompeolas que pueda producir potencia eléctrica (Ojima et al, 1985).

En Europa, convencidos del gran potencial y número de fuentes marinas, así como de su posible desarrollo industrial, un grupo de compañías, todas miembros de Eurocean, organización especializada en la promoción e implementación de proyectos relacionados con la explotación de los océanos, trabajaron juntas durante un período de 12 meses en el cual no sólo se revisaron y analizaron los requerimientos de energía para el futuro sino que empezaron a demostrar que la energía del océano es un concepto realista. Se identificaron los sistemas más prometedores de entre los muchos propuestos y la estimación de que tan extenso y con que dificultad se podría ir cubriendo la demanda energética a nivel tanto local y nacional, como regional e internacional.

Como se puede apreciar, la idea o el tema en si no son nada nuevo. Durante los casi 200 años que han transcurrido desde la primer patente, han sido muchas las personas que han dedicado gran parte de su vida a la busqueda de sistemas de conversión cada vez más eficientes y nombres como Stphen Salter, Yoshio Masuda, y Michael E. McCormick, entre otros, son comunes en el tema ya que han dado solidez al desarrollo de sistemas útiles para la conversión de energía del oleaje.

4 MATERIALES Y METODOLOGIA.

Bajo los límites que, por sus dimensiones y funcionamiento, marca el canal de ondas del laboratorio de oleaje de la Facultad de Ciencias Marinas (F.C.M.), U.A.B.C. se construyó un modelo de convertidor directo. Se probó su funcionamiento y se realizó su análisis de eficiencia. En esta sección se mencionan los pasos seguidos, así como los materiales, herramientas e instrumentos que de una u otra forma se aplicaron.

4.1 EN TALLER.

A continuación se describe la forma de planeación, modificación del diseño, construcción e instalación del modelo en el canal de ondas.

Se inició con una medición detallada de las dimensiones físicas del canal de ondas de la F.C.M., los límites en cuanto a capacidad de agua, generación de olas y sus características, así como del espacio libre para dimensionar a éste el tamaño del convertidor.

Se encontró 3 diseños de sistemas con posibilidades de adaptarse al canal de ondas, siendo estos uno de tipo neumático; otro, un sistema mecánico que convierte la energía del oleaje directamente en electricidad y el tercero un modelo a escala de un convertidor de tipo "cuerpos deformables".

Dada la dificultad en cuanto a la obtención de piezas de función específica como son válvulas, reguladores, líneas, etc, así como la cámara de almacenamiento y motor neumático que respondiera a la presión obtenida para el primer modelo, y la complejidad del pequeño sistema hidráulico y alto costo del tercero, se optó por llevar a cabo la construcción del sistema mecánico directo.

Para la construcción de éste, el mandar a fabricar o bien hacer los engranes, ejes de rotación, bandas de transmisión de movimiento, etc, hubiera resultado muy costoso y por ello se optó por construir un modelo modificado al propuesto por Baz & Morcos (1978) para el cual se utilizan partes mecánicas de bicicleta y un flotador de lámina (Fig. 1). Las modificaciones que se hicieron al modelo de Baz y Morcos radican básicamente en el sistema mecánico ya que para ese, una de las piezas principales para lograr su funcionamiento

es el eje de rotación de la rueda (pieza final del sistema mecánico) y en el presente modelo modificado, dicha función se lleva a cabo antes de que el movimiento llegue a los últimos 3 engranes.

El sistema mecánico en sí consta de 6 estrellas (2 de 49.53 cm, 2 de 35.56 una de 63.5 y una de 66.04 cm de perímetro), 3 piñones, 4 cadenas de distintas longitudes, un sistema cambiador de 5 velocidades y una rueda de 26 pulgadas de diámetro con su llanta; funcionando todo esto sobre 5 ejes de rotación montados sobre un cuadro de bicicleta sostenido a su vez por una base construida con tublar cuadrado y unido al flotador mediante una estructura metálica elaborada del mismo material. Entre el modelo y la base que lo sostiene en el canal, se colocó una parrilla de varilla cuadrada sólida que por medio de 4 tornillos da al aparato la capacidad de cambiar de altura de acuerdo a los agujeros de la base en que dicha parrilla se coloque. El funcionamiento del sistema se describe en el apéndice B. Por ahora es conveniente entender que el movimiento oscilatorio del flotador se transmite en movimiento circular en un sólo sentido.

Lo que produce la electricidad es un dinamo de bicicleta común, el cual tiene capacidad de generar hasta 6 V. A dicho dinamo se le adaptó un tornillo, el cual mediante una banda elástica reduce la fricción, causada por la presión que el resorte del dinamo ejerce para unir éste a la llanta, la cual resultaba excesiva y reducía el voltaje generado.

De este modo, quedó construido el modelo de convertidor directo el cual cuenta con las facilidades de variar su altura con respecto al nivel de agua, el peso con el que el flotador funciona, la velocidad de la rueda por medio del cambiador de 5 velocidades y la reducción al mínimo la fricción existente entre la llanta y el dinamo, todas ellas características útiles que permiten encontrar la posición óptima del aparato en el canal de ondas y lograr un mejor funcionamiento.

4.2 EN LABORATORIO.

Concluida la construcción e instalación del modelo de convertidor directo en el canal de ondas, se llevaron a cabo una serie de pruebas con la finalidad de encontrar la forma

que mejor funcionara. Se probó la generación eléctrica con 2 distintos dinamos, uno de 6 V de salida y otro de 12 V. El de mayor salida resultó ser demasiado "pesado" para girar con la fuerza que la llanta alcanzaba a desarrollar frenandola casi por completo. El dinamo de 6 V en cambio, si funcionó como se esperaba alcanzando a registrar señales eléctricas suficientes para encender un foco de lámpara de mano y su voltaje de salida resultó útil para el experimento.

Por otro lado, una vez lograda la generación de señales eléctricas se fueron variando tanto la profundidad del canal de ondas y la altura del aparato con respecto al nivel de agua, como el contrapeso del flotador y la velocidad con que el sistema generador de ondas funcionaba por un determinado tiempo. De este modo se tomó la decisión en cuanto a que altura y contrapeso se usarían en el experimento de eficiencia.

Posteriormente, sin el convertidor funcionando, se trabajó con el canal de ondas en la elaboración de curvas de calibración con la finalidad de conocer a que velocidades del motor y con que amplitudes del brazo generador de ondas se producian diferentes olas (en cuanto a períodos y alturas principalmente), para con ello poder controlar dichos parámetros con mayor exactitud a la hora de aplicarlos en el análisis de eficiencia.

En este aspecto lo que se hizo fué ir variando en el canal de ondas, para una determinada columna de agua, las amplitudes del brazo generador y la velocidad del motor que acciona dicho brazo; de este modo, para tirantes de agua de 20, 25, 30, 35 y 37.5 cm, se varió la amplitud del brazo (Fig. 2) en 5, 10, 15 y 17.5 cm y la velocidad del motor en 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 (en la escala que tiene la manija del control de la velocidad, Fig. 3) ó hasta el límite antes de rebosar agua.

Para finalizar el trabajo de laboratorio, se llevó a cabo el experimento de eficiencia, el cual consistió en calcular la potencia de las olas antes y después de pasar por el convertidor, así como la obtenida por el dinamo como producto final de la conversión. Para la obtención de los datos de esta fase, se siguieron los siguientes pasos.

En principio se observó que no se tenía homogeneidad en el giro de la rueda durante el funcionamiento del convertidor para un régimen de ondas dado, presentándose pequeños picos de voltaje tanto al subir como al bajar el flotador, lo cual impidió llevar a cabo las mediciones directas del voltaje, y el cálculo de la corriente y con estos, de la potencia. Este problema se solucionó mediante la caracterización del dinamo en cuanto a la respuesta que este tiene a las variaciones de las revoluciones por minuto (r.p.m.) y la potencia resultante. Para esto se utilizó un torno de velocidad variable (Fig. 4) que era ajustado en sus r.p.m. mediante el uso de un estroboscopio y al cual se le unió el dinamo para generar energía de manera constante.

Luego el voltaje generado se medía en forma directa con un voltímetro digital (voltaje neto) y posteriormente dicha diferencia de potencial se hacía pasar sobre una resistencia variable de 0 a 25 ohms a 5 W, midiendo nuevamente el voltaje. De esta forma se lograba medir directamente la corriente con un amperímetro digital (Fig. 5). Una vez obtenidas dichas mediciones, usando:

$$P = V \times I, \quad (2)$$

donde:

P = Potencia (W).

V = Voltaje medido sobre la resistencia (V).

I = Corriente (Amperes).

se obtenía la potencia para el valor que la resistencia presentara en ese instante pero, dado que al aumentar el valor de la resistencia disminuye el voltaje y viceversa, se buscó mediante la variación del valor de la resistencia que el producto de $V \times I$ fuera máximo, representando esto la potencia máxima del generador para esas revoluciones por minuto. Este procedimiento se repitió para 17 cambios de velocidad del torno con incrementos de 100 r.p.m. cada uno partiendo de 400 r.p.m. ya que a menores velocidades tanto el torno como el estroboscopio dejaban de funcionar en forma correcta.

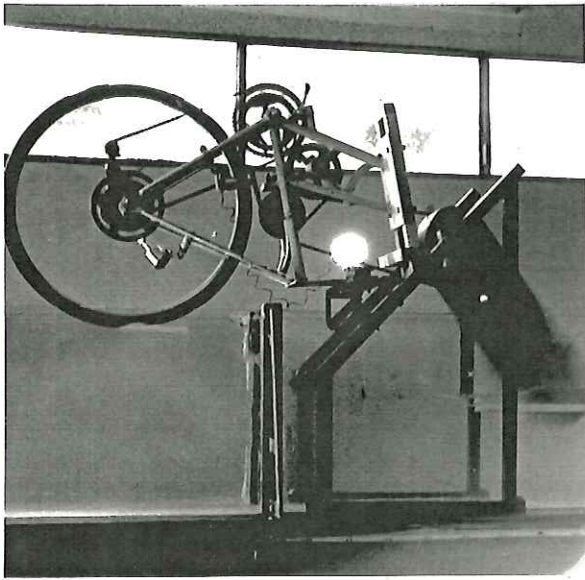


Fig. 1.- Modelo de convertidor directo.

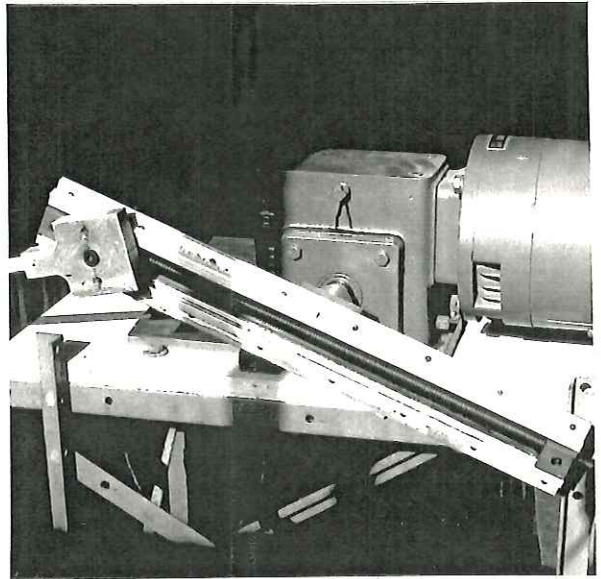


Fig. 2.- Control de la amplitud del brazo generador de ondas.

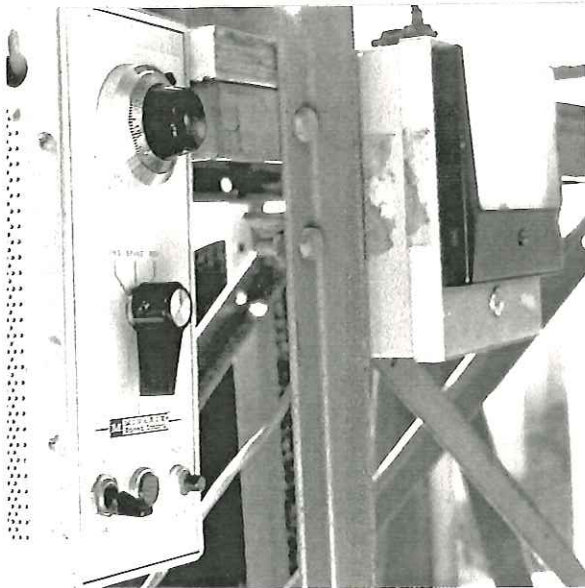


Fig. 3.- Control de la velocidad del motor generador de ondas.

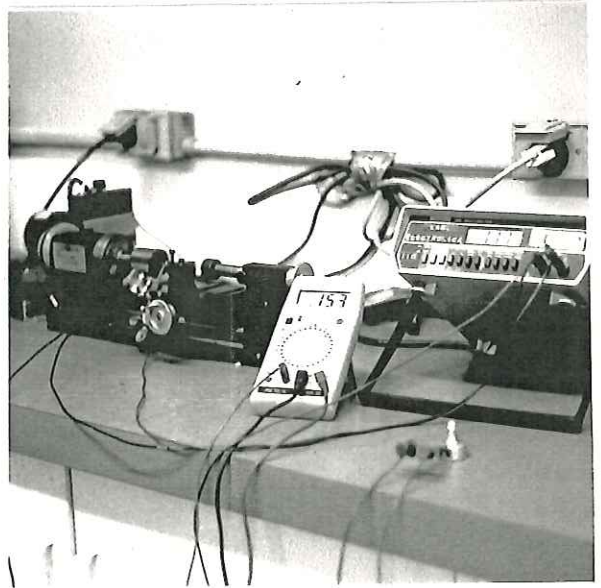


Fig. 4.- Experimento de caracterización del dinamo.

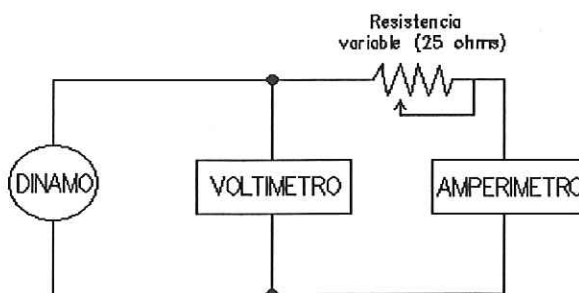


Fig. 5.- Diagrama de conexión de los instrumentos de medición utilizados para la caracterización del dinamo (medición de voltaje, corriente y cálculo de potencia).

Los datos obtenidos del experimento (voltajes y potencias) fueron posteriormente graficados contra las r.p.m. para observar su comportamiento (Figs. 6 y 7). Mediante una regresión lineal se obtuvo la fórmula en base a la cual, partiendo de las r.p.m. se lograba en forma indirecta estimar sus valores correspondientes de voltaje y potencia. De este modo quedó caracterizado el dinamo y se facilitó su uso para la obtención de la potencia del convertidor en el canal de ondas.

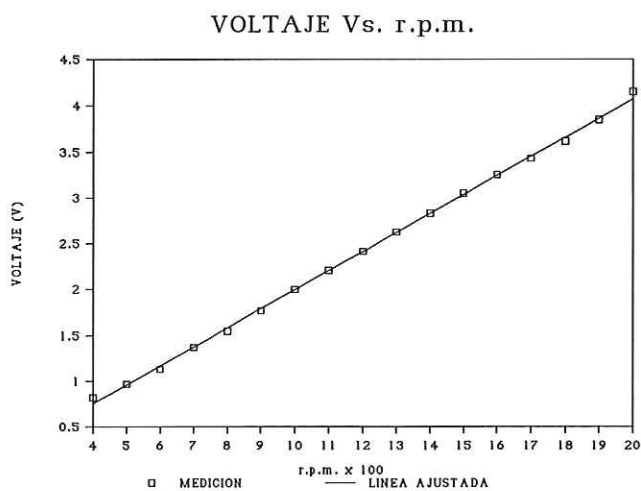


Fig. 6.- Caracterización del dinamo (voltaje en respuesta a la variación de las r.p.m.)

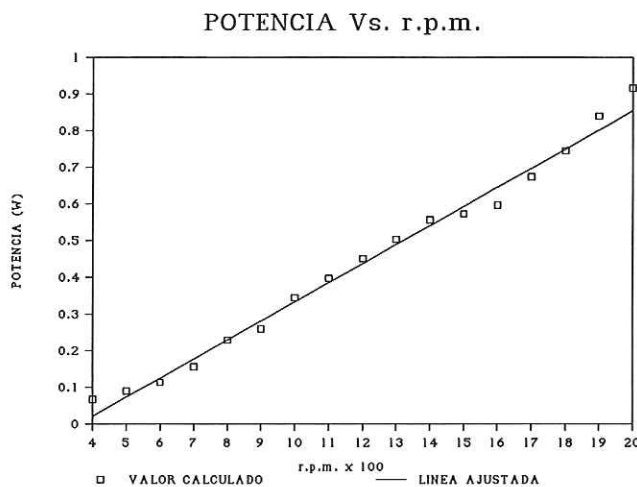


Fig. 7.- Caracterización del dinamo (potencia en respuesta a la variación de las r.p.m.)

Con las curvas de calibración obtenidas, se variaron las alturas de onda para un mismo período con incrementos de 1 cm aproximadamente a partir de la altura de 3 cm. Para cada variación de altura, antes de poner en funcionamiento el convertidor, se encendía el generador de ondas y se tomaba una fotografía de la onda generada teniendo una escala de referencia en metros. De igual forma se anotaban los períodos, medidos con cronómetro, y las alturas utilizadas para verificar o corregir las obtenidas de las curvas de calibración. Luego se colocaba el flotador en el agua y se medían las r.p.m. y el voltaje promedio que se generaba, para aplicar estos valores a la fórmula obtenida de la caracterización del dinamo y obtener así la potencia máxima producida por el modelo de convertidor.

Esto se hizo para 8 distintas alturas de ola y con dichos datos se obtuvieron los resultados que muestran los valores de potencia y voltaje producidos por el convertidor en cada altura de onda para el período de 1.14 s.

A la par de las mediciones de r.p.m. y voltajes, se tomó también fotografía de la onda luego de haber pasado por el convertidor y la medición aproximada de las alturas, concluyendo con esto el trabajo en el canal de ondas.

Una vez obtenida la potencia que arroja el convertidor para cada altura, se llevó a cabo la medición de las olas captadas por la cámara fotográfica para cuantificar con mayor precisión sus características (con excepción del período), esto mediante la proyección de los negativos ajustada a una escala que permitiera trabajar con comodidad en la lectura de los valores.

De este modo se contaba ya con valores confiables de las características de las olas en base a las cuales se determinó su potencia de la siguiente forma:

La energía total promedio por unidad de área superficial de una onda es la suma de las energías cinética y potencial. Kinsman (1965) y Dean & Dalrymple, (1984) expresan esta energía como:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2, \quad (3)$$

multiplicando la ecuación (3) por la longitud de onda de la ola, se obtiene la energía total por unidad de ancho de cresta:

$$E_L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L. \quad (4)$$

La potencia del oleaje es la razón a la cual la energía es producida o consumida. Para obtener la potencia por unidad de ancho de cresta, basta con dividir la ecuación (4) entre el período del oleaje:

$$P = \frac{E_L}{T} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \frac{L}{T}. \quad (5)$$

En particular para el experimento, la unidad de cresta a considerar viene a ser el ancho del flotador (b), que al multiplicarse por la Ec. (5), obtenemos la potencia total que está arribando al modelo de convertidor, esto es:

$$P_T = Pb = \frac{1}{8} \rho g H^2 b \frac{L}{T}, \quad (6)$$

donde:

P_T = Potencia total que arriba al modelo de convertidor.

ρ = Densidad del agua.

g = Gravedad.

H = Altura de la ola.

b = Ancho del flotador.

L = Longitud de onda.

T = Período de la ola.

Para el cálculo de la potencia total que arriba al convertidor se utilizó una densidad del agua (ρ) de 1000 Kg/m³, $g = 9.81$ m/s² y valores de $b = 0.155$ m, $L = 1.66$ m y $T = 1.14$ s los cuales se mantuvieron constantes durante el experimento, siendo la altura de ola (H) la única que se varió, ya que la energía del oleaje es directamente proporcional al cuadrado de ésta, y de allí la importancia de saber el comportamiento del convertidor en respuesta a sus variaciones.

El mismo procedimiento se utilizó para calcular la potencia de las olas luego de haber pasado por el convertidor.

Una vez aplicada la fórmula (6) para obtener la potencia total de las olas que arriban y las que pasan por el convertidor para 8 distintas alturas de ola, así como los valores de potencia máxima que el convertidor arrojó en respuesta a los cambios de altura y el cálculo

de la potencia de las olas luego de pasar por el convertidor, se llevó a cabo la estimación de los valores de eficiencia para cada una de las alturas de onda. De esta forma, al calcular que porcentaje representa la potencia que el dinamo genera en relación con la que las olas traían antes de pasar por el convertidor, se obtiene la eficiencia de generación eléctrica; al estimar el porcentaje que representa la potencia de las olas que ya pasaron por el convertidor con respecto a las olas generadas originalmente, se obtiene la eficiencia de extracción o conversión de energía y al calcular el porcentaje que la eficiencia de generación eléctrica representa en relación a la eficiencia de extracción, se obtiene el porcentaje de energía mecánica que no logra pasar a electricidad (pérdida por fricción del sistema mecánico).

5 RESULTADOS.

A continuación se muestran las tablas de valores medidos y calculados para cada uno de los experimentos descritos en la sección anterior. Además se establece bajo que condiciones se llevó a cabo el análisis de eficiencia y se da la explicación de el por que se eligió a éstas.

5.1 FUNCIONAMIENTO DEL MODELO.

El convertidor directo fabricado, es un mecanismo que cumple con sus funciones de rectificación, compensación y magnificación de movimiento, características que permiten convertir la energía de las olas generadas en el canal de ondas, en energía mecánica y eléctrica. Dicho sistema, bajo las condiciones de oleaje que el canal de ondas tiene capacidad de producir con 35.0 cm de profundidad, puede generar un máximo de 2.9 V, al mantener la amplitud de la paleta generadora en 17.5 cm, la velocidad del motor generador en 6.0 unidades, que corresponden a 1.14 s de período de las olas generadas y utilizando un contrapeso en el flotador de 800 g.

Para el establecimiento de la posición óptima del convertidor en el canal de ondas, se analizaron los resultados al realizar cambios tanto en el canal como en el convertidor de energía. Del canal se cambió la profundidad en 5 ocasiones manteniendo la paleta generadora en su máxima amplitud y el motor en su límite superior de r.p.m. antes de tener problemas de rebosamiento de agua. Del convertidor, se pudo observar que las velocidades (5) resultan ser útiles casi exclusivamente durante el "arranque" del movimiento y que para alcanzar el máximo número de r.p.m., se debía de cualquier forma cambiar a la velocidad mayor (piñon más pequeño) por lo cual se optó por dejar fija dicha velocidad y sólo se probó en sus 5 posibles posiciones de altura con respecto al nivel de agua y se usaron 4 posibles pesos en el flotador; sin peso (0), 800, 1200 y 2000 g. Los resultados de realizar tales variaciones se presentan en las Tablas I a la V, en las cuales se incluyen las

máximas r.p.m. alcanzadas por la rueda del convertidor con el dinamo en su posición útil. Tal información es presentada en los histogramas de la Fig. 8 para facilitar el análisis de elegir las óptimas. La 4ª altura, ya no es recomendable utilizarla dado que en la mayoría de los casos se nulificó el movimiento. En la 5ª altura el movimiento es nulo para todos los cambios de variables.

Tabla I.- r.p.m. desarrolladas por la rueda del convertidor para la altura del aparato 1.

Prof. (cm)	Contrapeso (g)	r.p.m.
20	0	1.8
	800	3.1
	1200	-
	2000	-
25	0	4.2
	800	10.0
	1200	10.1
	2000	-
30	0	15.1
	800	29.3
	1200	31.8
	2000	25.5
35	0	-
	800	-
	1200	-
	2000	-
37.5	0	-
	800	-
	1200	-
	2000	-

Tabla II.- r.p.m. desarrolladas por la rueda del convertidor para la altura del aparato 2.

Prof. (cm)	Contrapeso (g)	r.p.m.
20	0	1
	800	-
	1200	-
	2000	-
25	0	3.1
	800	-
	1200	-
	2000	-
30	0	16.3
	800	26.6
	1200	23.5
	2000	-
35	0	23.5
	800	42
	1200	42
	2000	-
37.5	0	18.5
	800	37.8
	1200	43
	2000	31

Tabla III.- r.p.m. desarrolladas por la rueda del convertidor para la altura del aparato 3.

Prof. (cm)	Contrapeso (g)	r.p.m.
20	0	-
	800	-
	1200	-
25	2000	-
	0	-
	800	-
30	1200	-
	2000	-
	0	26.2
35	800	-
	1200	-
	2000	-
37.5	0	23
	800	27.6
	1200	-
37.5	2000	-
	0	21.5
	800	31.7
	1200	26.3
	2000	-

Tabla IV.- r.p.m. desarrolladas por la rueda del convertidor para la altura del aparato 4.

Prof. (cm)	Contrapeso (g)	r.p.m.
20	0	-
	800	-
	1200	-
25	2000	-
	0	-
	800	-
30	1200	-
	2000	-
	0	-
35	800	-
	1200	-
	2000	-
37.5	0	11.6
	800	-
	1200	-
37.5	2000	-
	0	29.5
	800	-
	1200	-
	2000	-

Tabla V.- r.p.m. desarrolladas por la rueda del convertidor para la altura del aparato 5.

Prof. (cm)	Contrapeso (g)	r.p.m.
20	0	-
	800	-
	1200	-
25	2000	-
	0	-
	800	-
30	1200	-
	2000	-
	0	-
35	800	-
	1200	-
	2000	-
37.5	0	-
	800	-
	1200	-
	2000	-

La posición que proporciona el mayor número de r.p.m. entre las 5 distintas profundidades, resultó ser, para la profundidad de 37.5 cm y con el contrapeso de 1200 g la altura del aparato 2 alcanzando a desarrollar 43 r.p.m. con el dinamo funcionando, mas en estas circunstancias, las olas alcanzan a rosar la rueda y empieza a haber problemas de rebosamiento de agua y humedecimiento del dinamo. Es por ello que para trabajar en el análisis de eficiencia, se optó por la altura de aparato 2 pero con 35 cm de profundidad, con el contrapeso de 800 g donde alcanza a desarrollar 42 r.p.m. (sólo una menos que las máximas en 37.5 cm) y tanto el canal de ondas como el modelo, funcionan sin problemas dentro de un amplio intervalo de velocidades del motor generador.

Cabe mencionar que en las gráficas de la Fig. 8, las barras que marcan cero altura no precisamente indican que no haya movimiento, sino que éste en un momento u otro se nulifica ya sea o por que el flotador se brinca al otro lado de su posición funcional a causa del exceso de contrapeso, o bien por que sencillamente ya no hay contacto entre el agua y el flotador. Dichos datos se obtuvieron sólo para mantener continuidad en el experimento. De este modo fué que se determinó la posición en que el modelo se analizaría en cuanto a eficiencia.

En cuanto a la construcción de la curva de calibración, útil para determinar a que velocidades del motor y con que amplitudes del brazo generador de ondas, se producen que tipos de olas (en lo que a períodos y alturas se refiere), los datos resultantes de la variación de ambos parámetros son mostrados en las Tablas VI a la X.

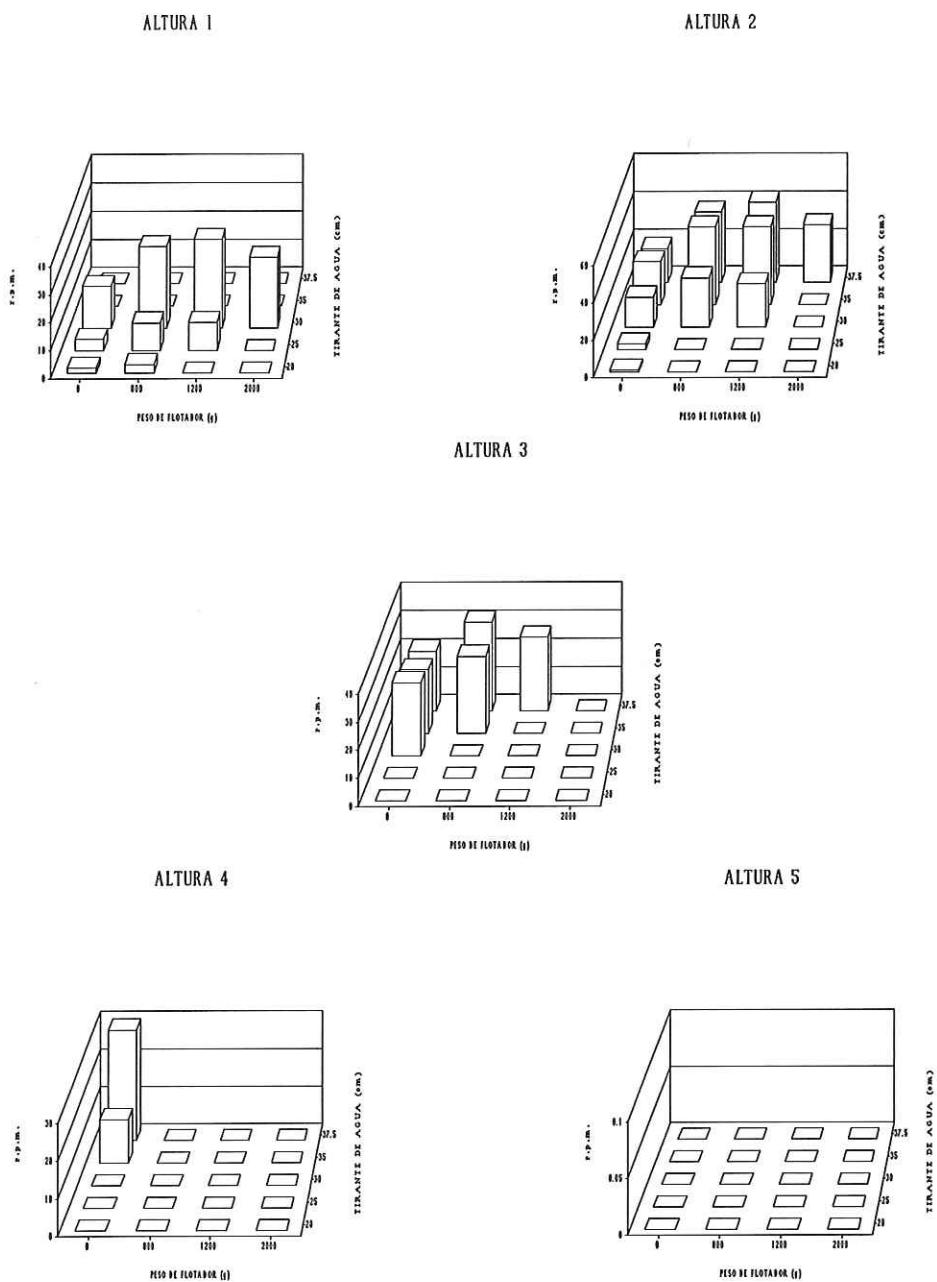


Fig. 8.- Comportamiento del convertidor (r.p.m.) para 5 distintas alturas del aparato en respuesta a la variación del contrapeso del flotador y la profundidad de agua en el canal de ondas.

Tabla VI.- Alturas de ola y períodos obtenidos al variar la velocidad del motor y la amplitud de la paleta para la columna de agua de 20 cm.

Velocidad del motor	Amplitud de paleta (cm)	Periodo de ola (s)	altura de ola (cm)
3	5	5.2	0.18
	10		0.40
	15		0.60
	17.5		0.80
4	5	2.3	0.6
	10		1.4
	15		1.7
	17.5		2.0
5	5	1.4	1.0
	10		1.8
	15		3.9
	17.5		4.1
6	5	1.15	1.3
	10		2.2
	15		3.7
	17.5		4.4

Tabla VII.- Alturas de ola y períodos obtenidos al variar la velocidad del motor y la amplitud de la paleta para la columna de agua de 25 cm.

Velocidad del motor	Amplitud de paleta (cm)	Periodo de ola (s)	altura de ola (cm)
3	5	5.2	0.35
	10		0.95
	15		1.6
	17.5		2.1
4	5	2.3	0.8
	10		1.4
	15		1.8
	17.5		2.3
5	5	1.4	1.3
	10		2.6
	15		4.1
	17.5		5.0
6	5	1.15	1.9
	10		3.7
	15		5.0
	17.5		7.5

Tabla VIII.- Alturas de ola y períodos obtenidos al variar la velocidad del motor y la amplitud de la paleta para la columna de agua de 30 cm.

Velocidad del motor	Amplitud de paleta (cm)	Periodo de ola (s)	altura de ola (cm)
3	5	5.2	0.32
	10		0.75
	15		1.2
	17.5		1.4
4	5	2.3	0.95
	10		2.9
	15		3.7
	17.5		4.3
5	5	1.4	1.8
	10		3.7
	15		6.0
	17.5		6.7
6	5	1.15	2.6
	10		5.3
	15		7.5
	17.5		9.2

Tabla IX.- Alturas de ola y períodos obtenidos al variar la velocidad del motor y la amplitud de la paleta para la columna de agua de 35 cm.

Velocidad del motor	Amplitud de paleta (cm)	Periodo de ola (s)	altura de ola (cm)
3	5	5.2	0.4
	10		1.5
	15		2.1
	17.5		2.5
4	5	2.3	1.1
	10		2.7
	15		4.3
	17.5		5.1
5	5	1.4	2.15
	10		4.7
	15		7.1
	17.5		8.5
6	5	1.15	3.2
	10		6.6
	15		12.0
	17.5		12.5

Tabla X.- Alturas de ola y períodos obtenidos al variar la velocidad del motor y la amplitud de la paleta para la columna de agua de 37.5 cm.

Velocidad del motor	Amplitud de paleta (cm)	Periodo de ola (s)	altura de ola (cm)
3	5	5.2	0.7
	10		1.45
	15		2.0
	17.5		2.4
4	5	2.3	1.8
	10		2.9
	15		4.7
	17.5		5.5
5	5	1.4	2.4
	10		5.3
	15		8.5
	17.5		11.0
6	5	1.15	3.7
	10		7.1
	15		13.1
	17.5		13.8

Dichos valores fueron graficados en isóneas de alturas de ola para cada profundidad; entonces, para la obtención de una altura de ola determinada, es posible encontrar sus correspondientes valores aproximados de velocidad del motor (eje de las "x"), así como las amplitudes de la paleta generadora de olas (eje de las "y"), obteniendo además el período de la ola el cual depende directamente de la velocidad del motor. De las 5 gráficas obtenidas se trabajó sólo con la correspondiente a la columna de agua que se utilizaría para el análisis de eficiencia (Fig. 9) obteniendo de ella los valores aproximados de amplitudes de la paleta generadora para una velocidad constante de 6.0 siendo la profundidad del canal de 35.0 cm.

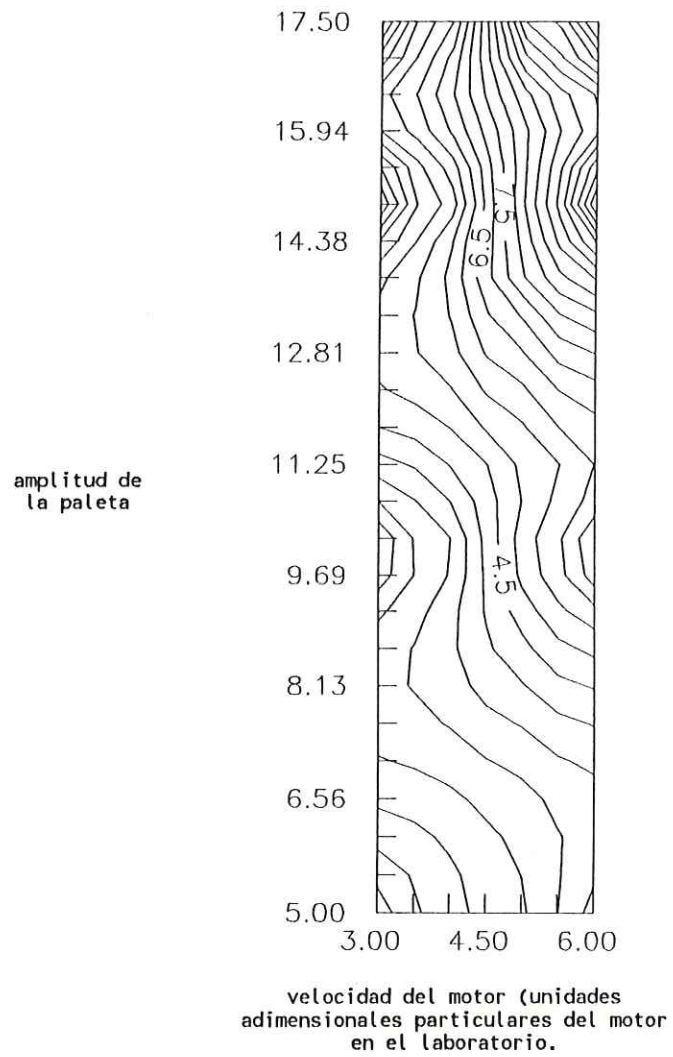


Fig. 9.- Curva de calibración utilizada para regular las características del oleaje a utilizar para el análisis de eficiencia.

5.2 EFICIENCIA DEL MODELO.

Los valores resultantes de la medición de las alturas de ola y cálculo de la potencia tanto de las olas antes de pasar por el convertidor, como luego de ello, se muestran en la Tabla XI.

Tabla XI.- Valores de potencia para cada altura de ola antes y después de pasar por el convertidor durante el experimento de eficiencia.

ALTURA ANTES (cm)	POTENCIA ANTES (W)	ALTURA DESPUES (cm)	POTENCIA DESPUES (W)
6.50	1.16	5.40	0.80
8.15	1.83	6.92	1.32
8.70	2.09	7.50	1.55
9.10	2.29	7.70	1.64
10.20	2.87	8.10	1.81
11.50	3.66	9.50	2.49
12.10	4.05	9.70	2.60
13.00	4.67	9.82	2.66

En base a estos y a la potencia eléctrica generada por el dinamo (Tabla XII) se obtuvieron los valores de eficiencia mostrados en la Tabla XIII.

Tabla XII.- Valores de voltaje y potencia arrojados por el convertidor asociados a las diferentes alturas de ola.

r.p.m.	VOLTAJE NETO ESTIMADO (V)	POTENCIA ELECTRICA (W)
561.12	1.08	0.10
699.31	1.37	0.17
802.32	1.58	0.23
907.85	1.80	0.28
1197.62	2.40	0.44
1271.32	2.56	0.47
1344.18	2.71	0.51
1447.20	2.92	0.57

En dicha tabla además se encuentran los resultados de potencia perdida por la ola luego de la conversión y porcentaje de pérdida por fricción en relación a la energía extraída a las olas;

Tabla XIII.- Valores de potencia perdida por la ola al pasar por el convertidor, eficiencia eléctrica, eficiencia de extracción y pérdida por fricción, asociados a las correspondientes alturas de ola.

POTENCIA PERDIDA POR LA OLA (W)	EFICIENCIA DE EXTRACCION (%)	EFICIENCIA ELECTRICA (%)	PERDIDA POR FRICCION (%)
0.362	30.98	9.18	70.38
0.513	27.91	9.77	64.99
0.538	25.68	11.14	56.61
0.651	28.40	12.59	55.66
1.064	36.94	15.29	58.61
1.162	31.76	13.08	58.81
1.448	35.73	12.75	64.31
2.008	42.94	12.20	71.58

todo ello para las distintas alturas de ola aplicadas durante el experimento conservandose constantes el período (1.14 s), y la longitud de onda (1.66 m.),

Graficando los valores de eficiencia con respecto a las alturas de ola, (Fig. 10) se puede observar que la eficiencia máxima es alcanzada con olas de 10.2 cm, y los valores de eficiencia para las alturas menores o mayores tienden a disminuir.

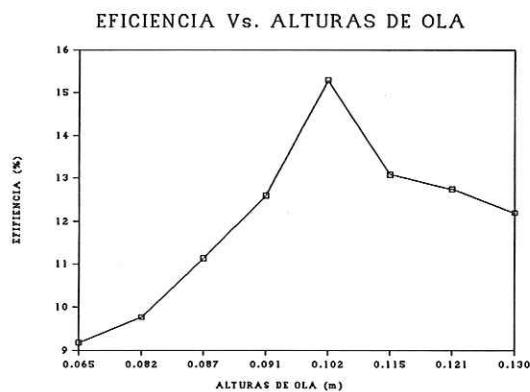


Fig. 10.- Comportamiento de la eficiencia en función de la variación de las alturas de ola cuando el período (T) es de 1.14 s

6 DISCUSIONES.

En esta sección se hace un breve análisis crítico a la fase experimental y manejo de los resultados.

Para el análisis de eficiencia del presente modelo de convertidor, se empleó la ecuación (6) donde L y T se midieron en forma directa sobre las características del oleaje producido en el canal durante el experimento de acuerdo a la metodología.

Se puede observar en los resultados de eficiencia (Fig. 10) que se presenta un punto máximo de eficiencia para la altura de ola de 10.2 cm y posteriormente tiende a caer para alturas mayores, esto resulta si consideramos que la rueda presenta, por un lado mayor dificultad para arrancar y por otro más facilidad para ser frenada por la fricción causada por el contacto con el dinamo cuando gira a baja velocidad. Sin embargo, existe un punto en el cual la velocidad desarrollada por la rueda es lo suficientemente alta, para evitar que la llanta sea frenada; al suceder esto, tenemos que tanto el flotador como los engranes que éste acciona, pasan más tiempo moviéndose sin aportar fuerza efectiva para el movimiento circular de la llanta, ya que ésta, por la velocidad que tiene en ese instante, debido a la inercia, no aprovecha el 100% de la fuerza disponible, ocasionando la disminución de la eficiencia para alturas mayores a los 10.2 cm. En otras palabras, el punto de máxima eficiencia se manifiesta cuando la fuerza que el flotador desarrolla es aprovechada completamente para ser convertida en movimiento circular.

Para alturas pequeñas (de 6 a 9 cm), se pierde eficiencia dado que el flotador desarrolla bajas velocidades en la rueda y el dinamo la frena con relativa facilidad; por ello, el esfuerzo del flotador es mayor y no aprovecha totalmente la energía que la ola lleva, tendiendo hasta cierto punto a reflejar más que a aprovechar la ola.

El 15% de eficiencia máxima alcanzada resulta satisfactorio si consideramos la sencillez del sistema ya que diseños más sofisticados, en su mayoría reportan eficiencias que no

rebasan el doble de la aquí obtenida. El presente modelo sin duda podría ser modificado para alcanzar mayor eficiencia principalmente si se parte de piezas especialmente diseñadas para un dispositivo de este tipo.

Entre las fuentes de error e ineficiencia, se tiene que los modelos de pequeñas dimensiones, alcanzan a generar sólo algunos miliwatts de potencia lo cual dificulta un tanto el manejo de los datos que se obtienen en cuanto a la exactitud de su medición. También tenemos que en estudios en canales de ondas o tanques de laboratorios de hidráulica, se pueden obtener datos confusos dada la posibilidad de presencia de olas atrapadas producto, por un lado, de la reflexión de la ola al llegar a la pendiente colocada al final del canal la cual no alcanza a disipar la energía totalmente, así como las producidas al reflejarse las olas en el convertidor regresando hacia el generador de olas y reflejandose de nuevo, teniendo esto como consecuencia la posible presencia de una zona con un régimen confuso de olas viajantes y olas atrapadas. Esto podría repercutir en la veracidad de los datos y la posible solución sería la utilización de un canal de gran longitud. Se trabajó bajo los límites del canal de ondas de la F.C.M. y lo que se hizo al respecto fué el reducir los lapsos de tiempo en la toma de datos para minimizar este efecto.

Por otro lado, sabemos que en condiciones de laboratorio las olas generadas son hasta cierto punto óptimas para la prueba de un aparato de este tipo, es decir, se producen olas simples lo cual si bien simplifica los cálculos matemáticos, los resultados experimentales no son 100% representativos de las condiciones oceánicas reales del oleaje, lo cual al llevar a cabo la prueba en el mar, podría resultar en pérdidas de eficiencia o incorrecto funcionamiento.

En particular el modelo construido para el presente trabajo tiene como fuente de ineficiencia, principalmente, el hecho de estar constituido por piezas mecánicas de bicicleta, las cuales sin duda llenan los requerimientos para los que fueron diseñadas, pero en su aplicación para construir el convertidor, ciertos engranes carecen de precisión lo cual hace variar el funcionamiento constante del sistema mecánico por más ajuste que se le dé a las

piezas que lo conforman. Además de que la pérdida de energía causada por la fricción en el sistema mecánico es muy grande. De igual forma el dinamo utilizado presenta el problema de no ser eficiente y con toda seguridad un pequeño generador diseñado especialmente para el sistema arrojaría mejores resultados.

Las fuentes de error en cuanto al análisis de eficiencia son reducidas, dado que en el diseño de la metodología utilizada se planeó llevar a cabo las mediciones lo más exacto posible mediante el uso de fotografía, cronómetros de gran precisión, caracterización del dinamo, etc, y lo único que podría causar error son las condiciones de las olas generadas en el canal dados los problemas de reflexión.

El presente modelo no guarda una escala exacta con respecto a algún prototipo potencialmente aplicable en condiciones reales de oleaje, es por ello que no se llevan a cabo cálculos de la energía que se podría producir si el modelo se hiciera en mayores dimensiones. Incluso se sabe de antemano que el diseño es de los más simples e ineficientes y de dudosa aplicación en condiciones oceánicas, mas sin embargo, de él se logró obtener resultados útiles bajo las limitadas dimensiones y características del canal de ondas en que se probó para llevar a cabo el estudio y constituye un antecedente para futuros trabajos.

El uso del modelo a escala construido es principalmente para fines didácticos. Su aplicación en condiciones oceánicas reales requiere de modificaciones tanto en los límites de movimiento del flotador, como en su base además de la implementación de un sistema de fijación o anclaje. Usos y aplicaciones de modelos a escala real se mencionan en el apéndice C, así como otros aspectos relacionados con la conversión de energía del oleaje como lo son las consideraciones a tomar para su instalación; se incluye también una comparación de esta fuente energética con las fuentes convencionales para visualizar las ventajas y desventajas que la idea presenta, y se hace mención de las localidades potencialmente útiles para la explotación del recurso.

7 CONCLUSIONES.

El oleaje, como fuente energética marina de origen solar, representa un recurso natural altamente renovable cuyas posibilidades de explotación son reales. La eficiencia máxima de 15% obtenida en el presente trabajo puede ser superada mediante modificaciones al diseño y principalmente mediante el uso de piezas diseñadas y fabricadas específicamente para su función en un convertidor. La prueba de un dispositivo de este tipo bajo condiciones oceánicas reales requiere de implementación en el diseño así como en el anclaje o fijación al fondo, además de las consideraciones previas a su instalación si es que se planea hacerlo a mediana escala. La densificación de la energía del oleaje mediante la inducción a resonancia en el medio, uso de canales convergentes o bien mediante el aprovechamiento del fenómeno de refracción del oleaje principalmente, puede ayudar a mejorar la eficiencia y a nivelar un tanto los precios de la energía obtenida de esta fuente con los de las fuentes convencionales. La variación de la potencia media con el tiempo, influenciada por la marea y las condiciones extremas del oleaje, constituyen un reto de diseño; mas dados los avances de la ciencia en el estudio de los fenómenos oceánicos, así como la evolución de los modelos de conversión, se podrá pronto aprovechar dicha fuente energética para su aplicación como un recurso bien adaptado a necesidades locales con la construcción de instalaciones de mediana o pequeña capacidad de generación sin afectar el equilibrio natural.

8 LITERATURA CITADA

- BAZ A. & MORCOS S., 1978.** *Development and Testing of a Direct and an Indirect Wave Energy Converter.* International Symposium On Wave And Tidal Energy, September 27th - 29th, 1978. Canterbury, England. Paper B7, p93 - 107.
- BELLAMY N.W., 1985.** *The Circular Sea Clam Wave Energy Converter.* Hydrodynamics of ocean wave energy utilization. IUTAM Symposium Lisbon/Portugal 1985. 445pp.
- BRIN ANDRE, 1981.** *Energy and the Oceans.* Ann Harbor Science Publishers Inc., Ann Harbor, Michigan U.S.A., 133pp.
- CONSTANS JACQUES, 1979.** *Marine Sources of Energy.* Pergamon Press Inc. Elmsford, New York, U.S.A., 155pp.
- DEAN R. D. & DALRYMPLE R. A., 1984.** *Water Wave Mechanics for the Engineers and Scientist.* Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A. 353pp.
- DELGADO G. OSCAR, 1988.** *Notas Sobre Oleaje.* Boletín N° 11, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, U.A.B.C., Ensenada, Baja California, México.
- HAGERMAN GEORGE M. Jr., 1985.** *Oceanographic Design Criteria and Site Selection for Ocean Wave Energy Conversion.* Hydrodynamics of ocean wave energy utilization. IUTAM Symposium Lisbon/Portugal 1985. 445pp.

- HIGGINS T.D., 1979.** *Dam-Atoll - A System for Extracting Energy From Ocean Waves.* Ocean energy, fifteen annual conference by the marine technology society, New Orleans, U.S.A., p86 - 90.
- KINSMAN B., 1965.** *Wind Waves Their Generation and Propagation on the Ocean Surface.* Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A. 676pp.
- KORDE U. A., 1990.** *Study of a Wave Energy Device for Possible Application in Communication and Spacecraft Propulsion.* Ocean Engineering Vol. 17 No. 6, pp 587 - 599, 1990.
- LANDSBERG HANS H. 1979.** *Energy: The Next Twenty Years.* Report By a Study Group of the Ford Foundation and Resources for the Future. Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, U.S.A. 628pp.
- LANKFORD ROBERT R, 1977.** *Coastal Lagoons of México, Their Origin and Classification.* Estuarine processes vol. II, Academic Press, p 182 - 206.
- LUNDBERG JAN C., 1981.** *World Energy Needs Vs. Potential Resources.* Eighth annual Pacific coast sea power forum, Energy and Sea Power - Challenge for the Decade. Pergamon Press Inc. Elmsford, New York, U.S.A. 120pp.
- MASUDA Y. & MIYAZAKI T., 1978.** *Wave Power Electric Generation Study in Japan.* International Symposium On Wave And Tidal Energy, September 27th - 29th, 1978. Canterbury, England. Paper B6, p85 - 91.

- MASUDA YOSHIO, 1979. *Experimental Full Scale Result of Wave Power Machine KAIMEI in 1978*. First Symposium On Wave Energy Utilization, Gothenburg, Sweden. P 349 - 363.
- MASUDA YOSHIO, 1985. *An Experience of Wave Power Generator Trough Tests and Improvement*. Hydrodynamics of ocean wave energy utilization. IUTAM Symposium Lisbon/Portugal 1985. 445pp.
- McCORMICK MICHAEL E., 1981. *Ocean Wave Energy Conversion*. John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., U.S.A. 233pp.
- NATIONAL GEOGRAPHIC, 1981. *Energy*. A special report in the public interest. Facing up to the problem, getting down to solutions. Febrero, 1981, Washington, D.C. U.S.A. 115 pp.
- OIL & GAS JOURNAL, 1992. Volumen 90, Número 10. PennWell Publishing Co., Tulsa, Okla. P 89 - 90.
- OJIMA R., TAKAHASHI S. & GODA Y., 1985. *Hydrodynamic Aspect of PHRI Caisson Breakwater with Wave Power Extraction*. First Symposium on Wave Energy Utilization in Japan. Ocean Engineering. Pergamon Press Ltd. Vol. 12, N° 6 p 543 - 598.
- PANICKER N.N. 1977. *Energy From Ocean Surface Waves*. The energy technology conference. Ocean Energy Resources. The american society of mechanical engineers, New York, N.Y., U.S.A. 83pp.

- PICHA E. K., MIDBOE E. & HUDON T., 1981. *Performance Evaluation of Generic Wave Energy Systems*. 8th Ocean energy conference, Washington D.C., U.S.A. pp. 183 - 188.
- PLEASS C. M., 1978. *The Use of Wave Powered Systems for Desalination: a New Opportunity*. International Symposium On Wave And Tidal Energy, September 27th - 29th, 1978. Canterbury, England. Paper D1, p1 - 10.
- PROBERT P. K. & MITCHELL R., 1983. *Enviromental Implications of Wave Energy Proposals for the Outer Hebrides and Moray Firth*. Ocean Engineering, Vol. 10 No. 6. Pergamon Press. pp. 459 - 469
- READER'S DIGEST, 1991. *Como Son y Como Funcionan Casi Todas Las Cosas*. Primera edición, Reader's Digest de México, S.A. de C.V., México, D.F. 447pp.
- ROSS DAVID A., 1978. *Oportunities and Uses of the Ocean*. Spinger - Verlag New York, N.Y., U.S.A. 320pp, cap. 9, p275 - 291.
- ROSS DAVID, 1980. *Energy From the Waves*. Second edition, Pergamon International Library of Science, Technology, Engineering and Social Studies. 148pp.
- SALTER S. H. 1974. *Wave Power*. Nature vol 249, No. 5459, June. p 720 - 724.
- SILVESTRE MENDEZ JOSE Y ZORRILLA SANTIAGO, 1986. *México por Entidades Federativas*. Ediciones Océano, S.A. primera edición, México, D.F. 318pp.

SKINNER BRIAN J., TUREKIAN KARL K., 1976. *El Hombre y el Océano*. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, España. 150pp, cap 5, p82-93.

WHITE H.E., 1981. *Física Moderna*. Editorial UTEHA, Sexta edición, tomo I, España. 876pp.

9 APENDICE A

PANORAMA MUNDIAL EN CUANTO A ENERGETICOS.

Existen diversas clases de energía: la calorífica, la acústica, la luminosa, la mecánica, la nuclear, la química, la eléctrica, etc, y cada una de ellas juega un papel importante en nuestra vida diaria. La energía toma importancia desde el momento en que representa una entidad fundamental común a todas las formas de materia en el mundo físico. Uno de los conceptos más importantes de toda la naturaleza es el que se refiere a la energía (White 1981).

La energía es el motor económico del mundo. La liberación controlada de la energía destinada a facilitar las labores humanas y la capacidad de transformar una forma de energía en otra, son parte fundamental de la industrialización occidental. A medida que esta cultura y la población que mantiene aumentan, cada día se depende más de un suministro continuo de energía suplementaria de bajo costo. (Skinner y Turekian, 1976). De los combustibles comunes, el petróleo es el más versátil y conveniente; en el pasado se manejó como muy abundante y prueba de ello es que hasta hace menos de 3 décadas, el petróleo crudo se vendía por menos de 2 dólares el barril (National Geographic 1981).

Sin embargo, contrastando con lo anterior, tenemos que **la era de la energía abundante y barata ha terminado.**

Durante 1973 se presentó una gran crisis de hidrocarburos; el precio por barril aumento de 3 dólares en 1973 a más de 32 dólares para 1980. El abastecimiento mundial fué amenazado durante la guerra de Iran e Irak y en 1981, estimaciones conservadoras proyectaban para 1985 un precio de 80 dólares/barril suponiendo que se estableciera la paz en el Golfo Pérsico y se mantuviera en ese sentido cierta estabilidad (National Geographic 1981). Tan grave fue la situación que incluso se llego a proponer el racionar la gasolina en Estados Unidos en 1980.

Por fortuna no se llegó a tales límites e incluso se ha logrado mantener relativamente estable el valor del tan preciado "oro negro", costando en la actualidad, de acuerdo a estadísticas presentadas para la semana del 9 al 16 de Marzo de 1992, sobre precios mundiales de crudo de entre 15.60 y 19.00 dólares/barril (Oil & Gas Journal, 1992).

El problema del déficit entre las necesidades de energía y la disponible en los años por venir es bien conocido. La Fig. 11 sugiere cual podría ser el consumo de energía a nivel mundial para el año 2000 con una escala equivalente en millones de toneladas de petróleo por año (Constans 1979).

Se prevee que el año 2000 marque el principio de un decremento en la producción de petróleo así como el inicio de un serio déficit energético. Incluso se menciona como límite estimado de duración de las reservas petroleras conocidas en todo el mundo el año 2020 y con ello será preciso encontrar nuevos yacimientos, quizás en lugares cada vez más inaccesibles (Reader's Digest, 1991).

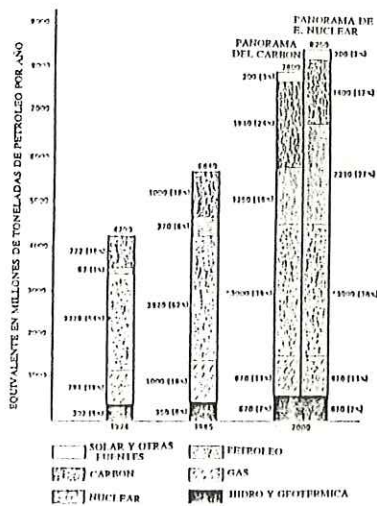


Fig. 11.- Consumo de energía estimado para el año 2000. (tomado de Constans, 1979).

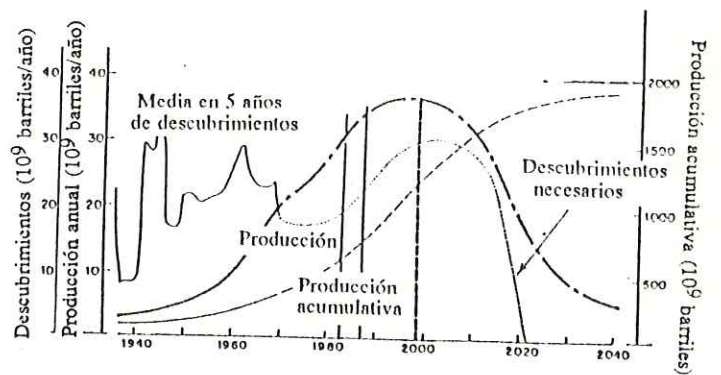


Fig. 12.- Producción mundial de petróleo, producción acumulativa y descubrimientos. (tomada de Constans, 1979).

Lo que el año 2000 podría significar se ve claramente en la Fig. 12. Esta curva, elaborada en 1979, pronostica que en algún lugar entre 1983 y 1987, la razón de producción empezaría a decaer y crear una situación desbalanceada entre la producción y la demanda, lo cual traería como consecuencia un considerable incremento sobre el precio general en los próximos años (Constans, 1979). Comparar con exactitud lo que se esperaba con lo que realmente sucedió no es fácil, sin embargo se puede intuir que existe un déficit, algunas guerras cuyos motivos reales son desconocidos o dudosos, bien podrían tener como una de sus causas principales este aspecto, siendo la guerra del Pérsico en 1991 un ejemplo probable.

Lundberg (1981), presentó una clara recopilación de las cantidades de energía en porcentajes que cubrían para 1979 las diversas fuentes convencionales (petróleo, gas natural, energía nuclear, hidroeléctrica, y de combustibles sintéticos) así como lo que se prevee que ocurrirá para el año 2000 (Fig. 13).

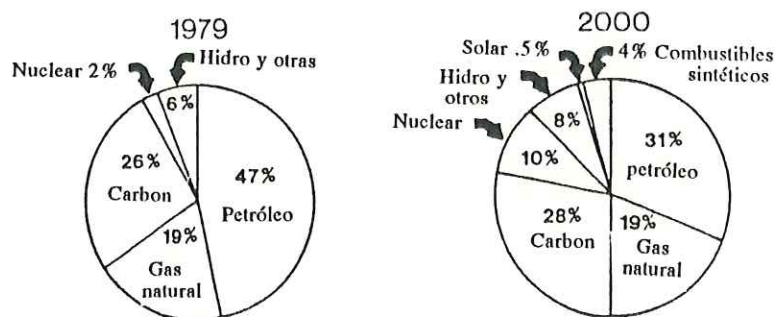


Fig. 13.- Porcentaje de suministro de energía que cubrían para 1979 las fuentes convencionales y lo que se prevee para el año 2000 (tomado de Lundberg, 1981).

Menciona al carbón como la mayor fuente futura de producción de energía, mas la maquinaria que hace uso de éste tendrá que evolucionar en tecnología ya que su combustión libera grandes cantidades de contaminantes lo cual amenaza al medio ambiente. También

maneja a la energía nuclear como fuente importante de aporte a lado de las demás, pero esto condicionado a la mejoración de los aspectos de seguridad en la utilización de dicha fuente. Menciona además que la demanda petrolera mundial podría incrementarse de 66 millones de barriles al día en 1980 a 77 millones barriles/día para el año 2000 y que, sin embargo, se tiene la esperanza de que el abastecimiento de petróleo permanezca en paz con la demanda pero esto suponiendo que se logre cubrir un 56% de la demanda con petróleo de reciente descubrimiento, 36% a ser descubierto y 8% de plantas productoras de combustibles sintéticos a ser construidas; mas no se tiene plena seguridad de cubrir dicho déficit.

Lo anterior deja ver con claridad que sin duda alguna, en un futuro ya no muy lejano se presentarán graves problemas en el abastecimiento de energía por parte de las fuentes convencionales. Es posible lograr una disminución controlada en el uso de energía pero aún así subsistiría la inmensa demanda.

10 APENDICE B

CONSTRUCCION Y FUNCIONAMIENTO DEL MODELO

La construcción del modelo se inició con el flotador; se empezó elaborando un "esqueleto" de alambroón al cual se le unió, mediante soldadura de arco eléctrico, un eje de acero sólido de 2.54 cm de diámetro sobre el cual se desliza; luego dicho esqueleto se forró de lámina delgada soldada y sellada con soldadura de estaño y soplete de gas propano. En uno de los lados se colocó la estrella de 63.5 cm de perímetro y ambos extremos del eje del flotador fueron sujetos por 2 chumaceras atornilladas a la estructura que lo une al cuadro de bicicleta. Adicionalmente se colocó en el extremo del flotador un poste con rosca que permite colocar contrapeso.

Para armar el sistema mecánico, se empezó por dibujarlo anotando las características que cada pieza debería tener, así como el trabajo que debían realizar para que el producto final fuera un mecanismo que, así suba o baje el flotador (movimiento bidireccional), se mande fuerza unidireccional a la rueda para hacerla girar. Mediante el acomodo de los "engranes" de distintos diámetros y las cadenas que los unen, se logra también multiplicar el número de revoluciones por minuto que originalmente se obtiene, así como el que la fuerza que mande el flotador al subir, sea exactamente la misma que manda cuando éste descende. Esto es, en su funcionamiento cuenta con un sistema de rectificación, compensación de fuerzas y magnificación de movimiento.

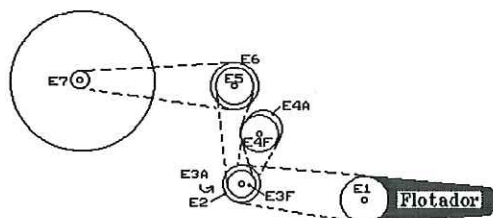


Fig. 14.- Mecanismo de magnificación de movimiento.

Para entender esto, y partiendo de que se tienen 5 ejes en el sistema de los cuales 3 comparten parejas de engranes y de los 2 restantes, uno corresponde a la rueda y otro al flotador, observando la Fig. 14 y tomando a E1, E2, E5, E6 y E7, como los engranes 1,2,5,6 y 7 y a E3F, E4F como engranes 3 y 4 de enfrente y E3A y E4A, los engranes 3 y 4 de atrás, así como giros positivos (+) cuando la dirección sea en sentido de las manecillas del reloj y negativos (-) cuando sea en contra, tenemos que el diámetro del engrane del flotador (E1), que es el que inicia el movimiento, es mayor que el de (E2) al que mueve por medio de la cadena C1. Por tanto cuando E1 gira una revolución (63.5 cm), E2 gira también los 63.5 cm pero como sólo tiene 40.64 cm de perímetro, se ve obligado a dar 1 vuelta y 22.86 cm más, o sea 1.56 revoluciones. Ahora bien, los engranes E3F y E3A darán también 1.56 vueltas ya que giran sobre el mismo eje que E2; pero como ambos miden 35.56 cm de circunferencia, esto equivale a mover sus cadenas (C2 y C3 respectivamente) 55.56 cm. Como a E3F y E3A se les unen E4F y E4A, y estos tienen 49.53 cm de perímetro, quiere decir que E4F y E4A girarán sólo 1.12 revoluciones por cada vuelta que da E1. En estas 1.12 vueltas que dan E4F y E4A, se recorrerán como se dijo, 55.56 cm, mas como estas hacen girar a E5, el cual tiene 50.8 cm de circunferencia, quiere decir que E5 girará 1.09 vueltas. A la par de éste, girará E6 pues tienen el mismo eje de rotación. Al hacer E6 las 1.09 revoluciones recorrerá a la cadena C4, por tener 66.04 cm de perímetro, una distancia de 72.23 cm Por último, como E6 mueve a E7, el cual mide sólo 17.78 cm de perímetro, esto equivale a que E7 de 4.06 revoluciones por una que E1 dió originalmente. Esto es fácil de comprobar dando al flotador un movimiento de 90° y observando a E7 dar un poco más de 1 revolución estando colocado E7 en el piñon más pequeño (velocidad 5). El diámetro de E7 se puede variar mediante el cambiador de velocidades para ayudar al flotador a desarrollar velocidad y después devolverlo al del diámetro menor para alcanzar más r.p.m. Básicamente en esto consiste el sistema de magnificación, lo cual implica que el movimiento que el flotador transmite al sistema, da una salida final 4 veces mayor que

la entrante (en cuanto a r.p.m.) y a esto aún se le puede agregar que por cada vuelta que de E7, misma que dará la rueda de la bicicleta, el dinamo girará 33.5 veces dada la diferencia de diámetros de ambos. Lo anterior se resume en la Tabla XIV.

Tabla XIV.- Número de revoluciones que cada engrane desarrolla cuando E1 gira 1 vuelta.

ENGRANE	REVOLUCIONES
E1	1
E2	1.56
E3F	1.56
E3A	1.56
E4F	1.12
E4A	1.12
E5	1.09
E6	1.09
E7	4.06
Dinamo	136.09

Como E3F y E3A tienen el mismo diámetro de igual forma que E4E y E4A, la fuerza que llega a E5, E6 y E7, es exactamente la misma cuando el flotador desciende que cuando este sube (compensación de fuerzas).

La explicación del mecanismo que rectifica el movimiento bidireccional del flotador, convirtiendolo en unidireccional al llegar a la rueda, es fácil de entender mediante las Figs. 15 y 16.

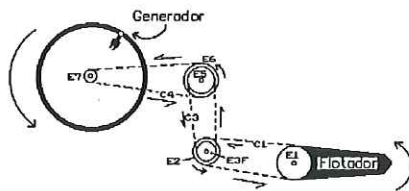


Fig. 15.- Movimiento del sistema mecánico cuando el flotador sube.

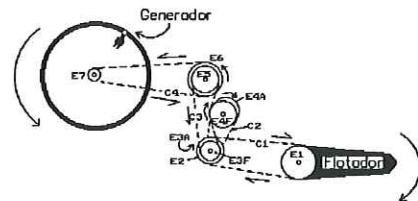


Fig. 16.- Movimiento del sistema mecánico cuando el flotador baja.

La Fig. 15 indica las direcciones en que cada uno de los engranes y cadenas se mueven cuando el flotador sube: E1, unido al flotador, gira (-) moviendo con él, mediante la cadena C1, a E2 (-) el cual tiene el mismo eje de rotación que E3F (-). Luego mediante la cadena C3 se hace girar a E5 (-) y con él a E6 (de eje común), siendo este último el que por medio de la cadena C4 manda movimiento a E7 (-).

La Fig. 16, muestra las direcciones en que cada una de las partes del mecanismo se mueve cuando el flotador baja: el engrane E1 gira (+) y con el, mediante C1, se mueve E2 (+) a la vez que E3A (+) sobre el mismo eje de rotación. Este último, mediante la cadena C2, produce movimiento en E4A (+) y con el también E4F (+) ya que pertenecen al mismo eje. la inversión del movimiento se produce cuando el mismo E4F (+) ensambla por uno de sus costados con la cadena C3 la cual produce movimiento directamente en E5 (-) y con el E6 (-), para finalmente mediante C4, mover a E7 (-). Aunque por medio de la cadena C3 se obligue a E3F a girar negativo, siendo que E2 y E3A giran positivos, el sistema no se "amarran" pues tanto E3F como E3A toman acción sólo en una dirección (opuestas para cada uno) y para la otra quedan libres sin tomar influencia en el sistema (sistema de trinquete conocido en Ingles como ratch). La cadena C2 une exclusivamente a los engranes E3A y E4A.

11 APENDICE C

USOS Y APLICACIONES DE LOS CONVERTIDORES DE ENERGIA DEL OLEAJE.

La literatura indica que un convertidor eficiente puede satisfacer las necesidades de energía eléctrica de pequeñas comunidades de pescadores, similares a las encontradas en nuestras costas e Islas.

A continuación se presentan comentarios y un panorama de los convertidores de energía del oleaje. Su uso principal sería el de producir o generar energía eléctrica, sin embargo, el principio puede ser utilizado con otros fines. Se ha demostrado que la construcción de plantas a pequeña y mediana escala tienen mayor eficiencia, desde el punto de vista económico, que las de gran escala.

Otro uso potencial, como se menciona en los antecedentes, sería la aplicación de la energía extraída del oleaje para la obtención de agua dulce a partir de agua de mar mediante el auto-bombeo a alta presión de agua salada, cuya fuerza es obtenida en forma directa de la energía de las olas. El principio de "auto-bombeo" podría ser también aplicable para llevar agua de mar a continente; con dicho uso se podría, por mencionar un ejemplo, cubrir las necesidades de un cultivo de alguna especie marina en estanques instalados en continente.

También resulta útil la construcción de boyas de navegación que mediante la obtención de energía de las olas, se dote de luminosidad a dichas boyas convirtiéndolas en pequeños "faros flotantes" que auxilien a embarcaciones en la navegación o bien para marcar zonas donde una plataforma pudiera causar estragos como sería por ejemplo un área de cultivo.

Mediante la instalación de un convertidor de energía a mediana escala, podría a la par producirse un rompeolas flotante altamente eficiente que logre proteger parte de la línea de costa de los efectos del oleaje. Masuda & Miyazati (1978) mencionan que una

cadena de convertidores en aguas a profundidades de 40 m, y a una distancia de 2.6 Km de la costa, podría producir un área libre de olas lo suficientemente amplia y útil para diversos propósitos como la pesca, acuicultura o recreación marina.

Otro punto interesante a mencionar es el que se refiere a las consideraciones que se deben tomar en cuenta para la instalación de un dispositivo de este tipo.

Algunas zonas presentan un número muy limitado de olas lo suficientemente grandes para lograr la conversión; otras en cambio, harían incluso peligrar la seguridad del personal operativo desde la instalación misma del convertidor o bien destruir por completo cualquier dispositivo de este tipo, implicando esto el considerar las condiciones más severas esperadas durante el tiempo o vida útil del convertidor.

Los estudios preliminares prevén principalmente las condiciones más adversas del oleaje que el convertidor deberá resistir, como las creadas tanto por huracanes (ciclones tropicales) como por las tormentas de invierno (ciclones extratropicales), Hagerman (1985) Menciona además que para determinar el área en que se instale uno de estos aparatos, se debe primero llevar a cabo la caracterización de las condiciones que el medio presenta en dicha zona. Considerando como zonas operacionales aquellas que presentan alturas de ola significativa de más de 1 m y una altura máxima de ola (en 1000 olas) menor a 12.5 m. Propone la obtención de la altura máxima de ola en 100 años, calculada en base a estadísticas ya sea de olas de huracanes o bien de tormentas de invierno. Luego, dividiendo el flujo medio anual de energía del oleaje, calculado en base a datos climatológicos (excluyendo las fases o estados no operacionales), entre las alturas máximas en 100 años, obtiene lo que él llama "valor de merecimiento" para un área determinada, concepto que viene a reflejar directamente el potencial económico del sitio más que la simple magnitud del recurso. Su trabajo analiza principalmente las costas de Estados Unidos. Claro que para llevar a cabo dicho estudio en áreas específicas se requiere de una buena fuente de información que contenga las estadísticas de oleaje y datos de estaciones meteorológicas y no en todas partes se cuenta con ello.

Es importante también la consideración del aspecto estético, ya que aparatos de grandes dimensiones podrían, si no se planea su ubicación, ser un tremendo contaminante visual.

En general la construcción de este tipo de aparatos se lleva a cabo con estructuras de acero y utilizando técnicas que convencionalmente se usan para la construcción de embarcaciones. Por la naturaleza de este tipo de materiales se debe tomar en cuenta el prevenir la corrosión y fijación de organismos (producto principalmente de la competencia por espacio), que el ambiente marino genera mediante el uso de recubrimientos anti-vegetativos y anti-corrosivos así como la protección catódica como se utiliza para estructuras costeras convencionales. El concreto podría ser una buena opción pero quizás incrementaría en forma considerable los costos (Constans, 1979).

La creación de dispositivos que no requieran de ser direccionados y que sean eficientes en toda la gama de oleaje que la zona potencialmente explotable tenga, representa un reto de diseño, mas dado el interés de la ciencia por conocer el comportamiento del oleaje, así como la acumulación de la información estadística y su análisis, han propiciado grandes avances y existen aparatos que alcanzan eficiencia de hasta 90% en condiciones de laboratorio, los cuales están en vías de probarse a escala real.

Otra categoría de consideraciones de importancia la constituyen aquellas relacionadas con el impacto ambiental.

La instalación de un convertidor ya sea de fondo, flotante en aguas profundas o bien fijo desde continente, definitivamente va a producir un cambio en las condiciones naturales del medio ambiente a consecuencia en principio de la reducción del nivel de energía del oleaje que arriba a dicha zona, así como por una variedad de efectos en el ambiente hidráulico. Es por esto que se hace indispensable el evaluar que impacto podría tener la localización de uno de estos dispositivos sobre una zona potencialmente explotable.

Probert y Mitchel (1983), mencionan los aspectos ecológicos que la instalación de un aparato de este tipo trae consigo, empezando por las consecuencias del cambio de nivel de

energía; afirman que el decremento de éste puede influir en las costas y áreas submareales resultando en cambios en la densidad y variedad de especies de organismos en la zona, así como la posible acreción de playas al reducir o nulificar la circulación y redistribución natural de sedimento a lo largo de la línea de costa, lo cual a su vez implicaría la posible erosión de algún área aledaña cuya estabilidad dependa del suministro de arena que la playa en acreción le proporcionaba, o incluso la posibilidad de clausura de bocas mediante la acumulación de sedimento en su entrada.

El sonido viaja largas distancias bajo el agua. El mismo ruido que una planta de obtención de energía generará, podría llegar a afectar el sistema de navegación y/o comunicación de algunas especies de peces y mamíferos marinos (como son las ballenas y las focas). Esto, aunque podría considerarse como una exageración ecologista, no está por demás el tenerlo en cuenta para localizar el sistema fuera de importantes rutas de navegación de dichas especies, o bien planear la eliminación del ruido desde el diseño mismo.

Los aparatos podrían representar un nuevo habitat para la colonización de especies marinas principalmente algas e invertebrados, así como peces, aves marinas e incluso mamíferos.

Los aparatos fijos al fondo, luego de terminar su vida útil, difícilmente serían extraídos y con el tiempo podrían llegar a convertirse en arrecifes artificiales lo cual es un cambio importante en el medio ya que se propicia la aparición de especies que originalmente no existían en la zona.

En cuanto a la navegación, se menciona el marcar con algún sistema de advertencia al radar la presencia del aparato, ya que el resultado de una colisión entre el convertidor y un buque petrolero o turístico por ejemplo, podría causar un derrame considerable de hidrocarburos o bien la pérdida de vidas humanas.

La transmisión de la energía por medio de cables submarinos, podría causar, tanto durante su instalación como al paso del tiempo, serios daños dada la remoción de considerables volúmenes de sedimento de fondo el cual contiene organismos o huevecillos

de estos (problema similar al que causan las obras de dragado). Esto tendría como solución el no transmitir la energía en esa forma, y se propone la transformación de la electricidad obtenida en hidrógeno y sus derivados para ser posteriormente trasladada a continente y una vez allí aprovecharla.

El mayor impacto sería consecuencia de la industrialización y crecimiento urbano, resultado de la explotación de esta fuente energética. Aquí estaríamos hablando de la contaminación inducida directa o indirectamente por la creciente comunidad, producto de dicho desarrollo en zonas rurales, o por el acelerado aumento de la misma, si es que se tratará de una ciudad, pudiendo llegar a tener dichas plantas mucho en común (en ese sentido), con las de la industria del petróleo y gas (Probert y Mitchel, 1983).

COMPARACION DEL RECURSO CON LAS FUENTES CONVENCIONALES.

Como fuente de electricidad, el oleaje tiene varias características distintivas: entre las desfavorables, se pueden mencionar el que las variaciones en la energía obtenida son muy grandes como para ser utilizada directamente y el ajuste de la salida de potencia irregular así como su almacenamiento, resultan caros. También la ocurrencia irregular del recurso tanto estacional (épocas del año), como las variaciones a corto plazo; el cambio de dirección o incidencia del oleaje con respecto al aparato y el deterioro que el ambiente marino puede llegar a causar a la estructura, así como la necesidad de que aún con estas agravantes, se obtenga una producción de potencia consistente (Picha, 1981). Dichos factores representan un gran obstáculo para la conversión, ya que la variación extrema de la media de alturas de ola, por ejemplo, crea diversos problemas de optimización de los diseños, siendo esto fácil de apreciar en los resultados cuando las condiciones de oleaje son distintas a las consideradas en el diseño. Lo anterior representa un problema que aparte de causar ineficiencia en modelos a escala real, hace necesario el contar con fuentes adicionales que respalden el suministro continuo cuando el oleaje no alcance a lograrlo.

A lo anterior habría que agregarle el que las olas están superimpuestas a las mareas lo cual podría variar el nivel de extracción de energía principalmente en diseños anclados al fondo o bien cercanos a la costa. Aparte, para lograr hacer competitiva dicha fuente de energía con las convencionales, se debe buscar amplificar la densidad de potencia por unidad de área antes de la conversión (Panicker, 1977).

La mayoría de estas limitantes han sido muy estudiadas y para cada una de ellas se han encontrado soluciones que si bien no resuelven totalmente el problema, si han ayudado a mejorar el funcionamiento de dichos dispositivos.

De esta forma, por ejemplo, con la finalidad de incrementar la densidad de la energía obtenida, se han propuesto soluciones como la inducción de resonancia en el medio, (Valembos, citado por Panicker, 1977); la utilización de canales convergentes que concentren la energía al final de estos (método descrito por Dhaille en 1956, citado por Panicker, 1977); y la manipulación del fenómeno de refracción para enfocar la energía en un punto determinado, propuesta por Von Arx en 1974 (citado por Panicker, 1977).

Brin, en 1981, menciona que tan pronto como se considere la instalación de convertidores sobre mayores longitudes a lo largo de la línea de costa, en el orden de decenas de Km, se podrán producir cantidades de energía que lleguen a complementar la demanda de una nación, siendo por ello que Países como Inglaterra y Japón han lanzado programas a gran escala sobre aparatos útiles en la recuperación de esta energía, mas en el mismo trabajo se menciona que la presencia de obstáculos de estas dimensiones podría crear a la vez un gran problema para la navegación proponiendo que esto se tome en cuenta para localizarlos lejos de las rutas de navegación así como fuera de las áreas usadas para la pesca y paseos recreativos.

Aparece otra desventaja cuando los sitios más favorables a explotar estén localizados lejos de los centros de consumo, ya que la transmisión de la energía hacia el continente, cuando ésta se lleve a cabo mediante la utilización de cables submarinos, aparte de ser costosa y difícil, produce pérdida de potencia la cual podría alcanzar hasta un 10% (Picha

et al, 1981). Sin embargo, el desarrollo de la investigación en cuanto al uso de superconductores podría solucionar en parte este problema. otra probable solución a esto podría resultar si se propone que la misma planta generadora llegara a acondicionarse como una "fábrica flotante", es decir, que se suministre energía a una pequeña industria para el funcionamiento de su maquinaria y que los obreros sean transportados a ella desde continente. Mas esto podría también crear efectos negativos principalmente de carácter ambiental, ya que difícilmente los desechos industriales que la "fábrica flotante" generara, iban a ser tratados o devueltos a continente y lo más fácil y comodo para deshacerse de ellos sería simplemente arrojarlos al agua.

El problema que la marea marca en este aspecto, puede encontrar solución mediante la creación de sistemas que monitoreen tanto las condiciones del oleaje y su dirección (antes de llegar al aparato), como el nivel de marea, y que tenga la capacidad de transmitir esta información al convertidor para que éste de alguna manera se ajuste a dichas condiciones de tal forma que las aproveche al máximo. En zonas donde el intervalo de mareas sea demasiado amplio, no sería el oleaje la fuente de energía a utilizar; lo sería la marea misma.

Entre las ventajas que la conversión de energía del oleaje presenta en la actualidad se encuentra, en primera instancia, su buena correlación temporal (en el año) con la demanda, es decir, el recurso es mayor en invierno que es cuando las necesidades de energía se incrementan; también otro aspecto a favor es el que la magnitud del recurso es enorme y renovable, se distribuye por todos los océanos y se propaga por sí mismo hacia continente. Esto podría considerarse muy útil, claro, bajo el entendimiento de que definitivamente el suministro de energía no todo el año sería constante pues varía de ser inmenso, a incluso llegar a nulificarse (dependiendo de las condiciones de oleaje que presente la zona), mas sí constituyendo una fuente energética que ayudaría a aliviar un tanto la demanda existente.

Las fuentes energéticas convencionales funcionan generalmente el base a hidrocarburos y energía nuclear. La obtención de energía podría no ser totalmente responsable del gran problema de contaminación ambiental que vivimos en la actualidad, mas con certeza se

puede afirmar que es una de las mayores fuentes. El consumo de combustibles fósiles, instalaciones hidroeléctricas y el uso de la energía nuclear, afectan en forma adversa la superficie de la tierra, el agua, la calidad del aire y con ellos, la salud humana. Los grandes buques petroleros contaminan los océanos tanto en maniobras rutinarias como por medio de derrames accidentales de grandes dimensiones. Por otro lado, además de esto, existen espectaculares amenazas de posibles accidentes nucleares y cambios climáticos (Landsberg, 1979).

La obtención de energía del oleaje en este contexto promete ser mucho más limpia y segura, es decir, el riesgo ecológico es de mucho menores dimensiones, y como se pudo apreciar en la sección anterior, la mayoría de los problemas de impacto ambiental que dicha fuente energética pudiera generar, tienen solución, basta con llevar a cabo los estudios previos que dichas consideraciones demandan.

En lo que a costos de obtención de energía se refiere, se sabe que con la tecnología actual y los precios que los hidrocarburos han logrado mantener, es imposible afirmar, en el presente, que el recurso constituido por el oleaje es económicamente explotable; el costo operativo de conversión podría ser pequeño dado que no hay consumo de combustible, mas el costo de inversión alcanzaría a ser sumamente alto dado que la estructura debe ser extensa y en ocasiones muy sofisticada. Pero también se sabe que los combustibles fósiles no durarán eternamente y en un futuro ya no muy lejano, cuando la escases sea grave, se incrementará su valor y entonces podrán nivelarse los precios. Para lograr compensar un tanto el costo de un sistema de conversión a escala real, lo más viable sería como se ha mencionado anteriormente, el proyectar una estructura de usos múltiples como lo puede ser un rompeolas-convertidor (Brin, 1981).

AREAS POTENCIALMENTE UTILES PARA SU EXPLOTACION.

En la literatura disponible sobre el tema, se pueden encontrar estudios que evalúan el promedio de potencia o el total de energía que el oleaje marino posee. Esta clase de evaluaciones resultan de gran utilidad para la determinación de una zona potencialmente explotable.

Diversos tipos de programas computacionales han sido desarrollados en los últimos años los cuales analizan, por ejemplo, la distribución y variación de la energía del oleaje de una determinada área y para un período de tiempo dado, usando como entrada las alturas y períodos de las olas. Con esta información se facilita el identificar los sitios más favorables para la instalación de un sistema de conversión.

Se ha establecido que los sitios más prometedores en este ámbito, están localizados en el Norte y Sur de las regiones templadas, mas un gran número de localidades potencialmente útiles existen en el resto del mundo, especialmente a lo largo de las costas de algunos países en vías de desarrollo, existiendo en estos sin embargo, la necesidad de crear y enriquecer una colección de datos estadísticos de oleaje y su procesamiento.

Panicker (1977), menciona la existencia de 2 "picos" de energía del oleaje; uno en el Océano Pacífico y otro en el Atlántico. El nivel de energía, para esa fecha, resultaba ser mayor en el Atlántico, Es importante mencionar que ambos picos de energía ocurren en longitudes que apuntan hacia los extremos Este de las cuencas oceánicas, lo cual podría ser esperado dada la dirección de los vientos provenientes del Oeste. Como se menciona, se presenta una acumulación de potencia en las latitudes medias (Fig. 17) siendo esto causado por que el área de océano dentro de cada banda latitudinal decrece del Ecuador a los polos en proporción al coseno de la latitud. Luego, si se graficara potencia por unidad

de área como función de la latitud, se localizaría la densidad de potencia a los 35° - 45° de latitud, siendo casi 3 veces más que la cercana al ecuador. Este resultado es esperado dado el pico de esfuerzo tangencial del viento en 30° Norte (Von Arx, citado por Panicker, 1977).

A nivel global, tenemos como ejemplo la Fig. 18 en la cual se muestra la distribución de energía del oleaje en las costas del mundo, siendo esta obtenida en base a datos de observaciones visuales de alturas y longitudes de onda en varias partes del mundo (Leiskman y Scobie, citados por Constans, 1979).

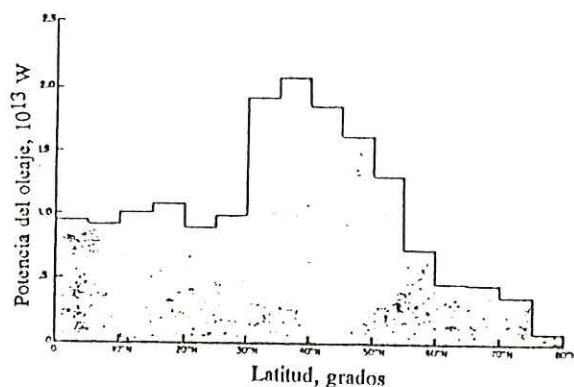


Fig. 17.- Distribución latitudinal de la potencia del oleaje (tomado de Panicker, 1977).

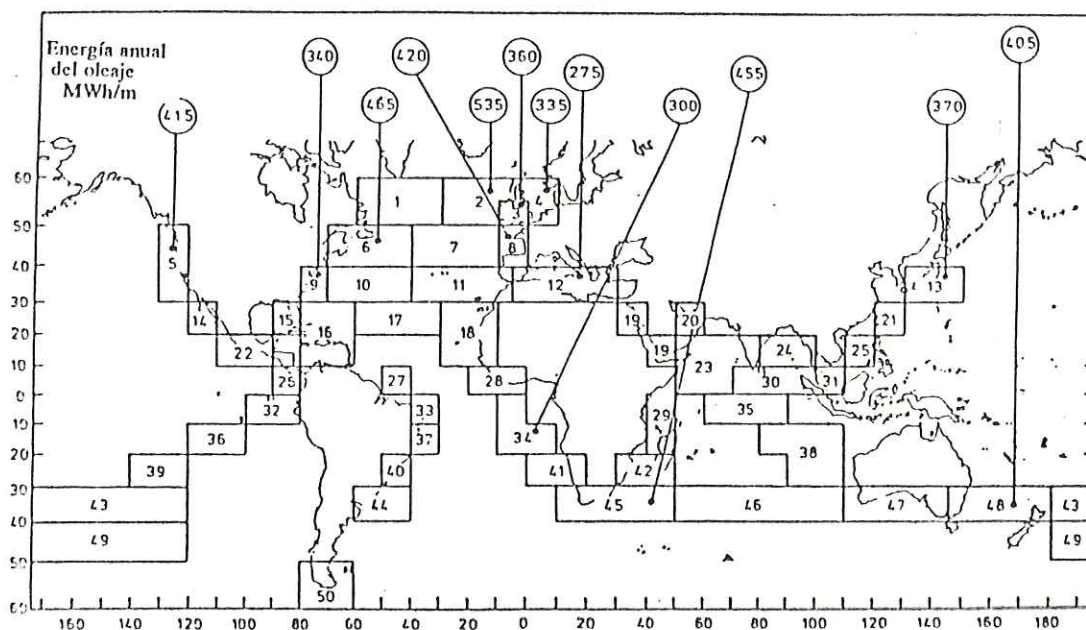


Fig. 18.- Distribución de la energía del oleaje a lo largo de las líneas de costa del mundo (tomado de Constans, 1979).

Claro está que los datos visuales son menos confiables que las mediciones con instrumentos y esta información, si bien no es formal, sí puede ayudar a establecer comparaciones útiles.

En la misma Fig. 18, podemos observar en particular que en México, las áreas que presentan un mayor potencial serían las correspondientes a los estados de Oaxaca, Chiapas y Veracruz, ya que en estas costas es donde se presentan los valores más altos de energía anual que corresponden de 22 MWh/m para costas del Océano Pacífico de Oaxaca y Chiapas así como para costas del Golfo de México, en Veracruz. En la Península de Baja California se presentan valores de 14 MWh/m en la costa Oeste, correspondiendo los valores más altos a la porción Norte de la Península. Como se podrá observar, los valores más altos de

promedio anual de energía que presentan las costas Mexicanas no están entre las de mayor potencialidad, mas presentan cifras bastante considerables y con un sistema eficiente de conversión, la cantidad a recuperar podría abastecer satisfactoriamente amplias regiones urbanas.