



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLAS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

**“PROTOTIPO DE UNA CENTRAL GENERACIÓN
BASADO EN ENERGÍA
UNDIMOTRIZ”**

**OBTENER TITULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTA
GEOVANI HERLINDO GOMEZ MOYA**

**ASESOR DE TESIS
DR. GILBERTO GONZALEZ AVALOS**

MORELIA, MICH. A OCTUBRE DE 2008



**FACULTAD DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Resumen

En la siguiente tesis abordan los beneficios de una de las llamadas energías renovables, la cual presenta en la actualidad una energía limpia y disponible, la cual en el pasado se había dejado a un lado por que a pesar de su potencial, los altos costos de su tecnología y la complejidad de la misma la estacaron por un periodo, en donde se abandono casi todos los proyectos realizados; afortunadamente en los últimos 30 años el interés de esta energía a resurgido y llego para quedarse, con nuevos proyectos y dispositivos capaces de competir con cualquier otra fuente incluso con la eólica la cual representa una de su mayores rivales.

En esta tesis se da un breve pero sustancial repaso por la mayoría de dispositivos capaces de captar la energía de mar convertir su potencial a energía mecánica para después convertirla a energía eléctrica, además de que se presenta el diseño y desarrollo de un prototipo con el cual se consiguen algunas experiencia y se comprueba el principio de funcionamiento con el cual se podría diseñar una mini central eléctrica ayuda en de esta manera a reducir las emisiones de CO_2 y aportar otra forma de generara energía eléctrica.

También se analizan el tema de la ventaja y desventajas así como de algunos costos en la generación y se presenta algunos ejemplos de centrales que están funcionando ya en países como Japón e Inglaterra.

Contenido

Agradecimientos	ii
Dedicatoria	iii
Resumen	ii
Lista de Figuras	V
Lista de Tablas	Viii
Lista de Símbolos y Abreviaciones	iX

Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Antecedentes, Descripción General del Problema	1
1.2 Objetivos de la Tesis	4
1.3 Justificación	
1.4 Metodología	
1.3 Descripción de los Capítulos	5

Capítulo 2 Energía del mar	6
2.1 Antecedentes Históricos	6
2.2 Aprovechamiento de la energía del mar	7
2.3. Fenómeno de la marea	8
2.3.1 Tipos de mareas	10
2.4 Funcionamiento de una central maremotriz	13
2.5 Ciclos de funcionamiento de la una central maremotriz.	14
2.6 Tipos de turbinas para mareas	17
2.7. Tipo de turbinas por las olas	21
2.8. Otra forma de aprovechar la energía del agua	36

Capítulo 3 Energía de olas y Desarrollo del Prototipo	38
3.1 Energía undimotriz	40
3.1.1 Capacidad de Generación	40
3.2 Tipo de Olas	42
3.3 Los dispositivos que se han construido para el aprovechamiento del olaje	42
3.4 Generación de electricidad utilizando boyas marinas	47
3.5 Consideraciones para la construcción del prototipo	48
3.6 Parámetros de la ola	50
3.7 Velocidad de olas	52
3.8 Desarrollo del prototipo a escala	54

Capítulo 4 Factibilidad de la energía Undimotriz

4.1 Antecedentes históricos recientes	61
4.2 Energía mareomotriz y de corrientes marinas	63
4.3 Energía de las Olas 2004-2008	64
4.4 Futuro Energía mareomotriz	67
4.4.1 Otras tecnologías de energía Oceánicas	69
4.4.2 Proyecto en México	72
4.5 Costos	73
4.6 Ventajas y desventajas de la energía Undimotriz	75
4.7 Comparación energía eólica	76

Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones	90
5.2 Recomendaciones	91

Lista de Figuras

2.1 Fenómeno de la marea	8
2.2 Deformación de la masa elástica	9
2.3 Esquema de una central mareomotriz	13
2.4 ciclo simple	15
2.5 Embalse con turbinas de doble efecto	16
2.6 Turbina Pelton	18
2.7 Turbina Francis	19
2.8 Turbina tipo Bulbo	20
2.9 Turbina bulbo Montada en un Dique	20
2.10 Tipo de turbina strafflo	21
2.11 Aprovechamiento del empuje de la ola	23
2.12 Aprovechamiento de la variación de la altura de la superficie de La ola	24
2.13 Cavidad o columna resonante	24
2.14 Rectificador de Russell	25
2.15 Péndulos OWC	26
2.16 Instalación de turbobomba para Chapman	27
2.17 Diversos esquemas de pato Salter	28

2.18 Cilindro Bristol	30
2.19 Balsa Cockerell	31
2.20 Rompeolas sumergido con turbina Bulbo	32
2.21 Esquema de funcionamiento de un OWC neumático	33
2.22 Convertidor Belfast	33
2.23 OWC Art Osprey	34
2.24 OWC Kvaerner	35
2.24 OWC de Madrás	35
2.26 Boya Masuda	36
2.27 Granjas marítimas	37
3.1 Dos partículas afectadas por el vaivén de un tren de olas	39
3.2 Se describen los elementos de una onda	40
3.3 Columna de agua oscilante	43
3.4 Describe el sistema pelamis	45
3.5 Elementos que conforman un pelamis	46
3.6 Describe la tecnología WaverRoller	47
3.7 Construcción de una boya nasuda	47
3.8 Partes que conforman una boya marina	48
3.9 Diagrama de bloques de un	48
3.10 Con una bobina, un amperímetro y un imán	48
3.11 Madera experimenta un empuje hacia	49
3.12 Parámetros de una ola	51
3.13 Energía, periodo y frecuencia de ola	51
3.14 Diferentes velocidades que se presentan en una ola	54
3.15 Diagrama de bloque de prototipo propuesto	55
3.16 Modelo físico construido	56
3.17 Sistema electro-magneto-mecánico	57
3.18 Sistema electro-magneto-mecánico montado en el estaque	57
3.19 Se muestra el prototipo	58
3.20 Sistema motor _ paleta	59
3.21 Boya – magneto – bobina	60
4.1 La nueva tecnología para aprovechar corrientes marinas	72
4.2 Tecnología que utilizara CFE en Rosarito, BC	73
4.3 Muestra la colocación de un prototipo para aprovechar el salto de olas	77
4.4 Muestra una boya generadora de 125 kW	78
4.5 Muestra la colocación de de boyas en una “granja marina”	79
4.6 Muestra claramente la diferencia entre las dimensiones de los aerogeneradores comparadas con las boyas	80
4.7 Mover con una velocidad un imán dentro del diámetro de una	81
5.1 Grafica de Emisiones de CO2 en nuestro país	88
5.2 Aprovechamiento de la variación de la altura de la superficie de la ola	92
5.3 Plataforma undimotriz	93
5.4 Un grupo de 16 boyas capaces 50Mw	94

Lista de Tablas

3.1	En kw/m según la profundidad donde se coloque el dispositivo	
3.2	Tabla 3.2 Material	57
4.1	Tabla 4.1 Resultados que arrojó la experimentación	85
5.1	Tabla 5.1 producción en porcentaje energía renovable	90
5.2	Tabla 5.2 Fuentes primarias energía en México	93
5.3	Tabla 5.3 de generación de energía eléctrica en México	93

Lista de Símbolos y Abreviaturas

K	kilo
M	mega
W	watts
<i>Km</i>	<i>kilometros</i>
<i>m</i>	<i>metros</i>
<i>Wh</i>	<i>watt-hora</i>
J	Joule
S	Entropía
h	Entalpía
CO ₂	Dióxido de carbono

Capítulo 1

Introducción

En los océanos se producen mareas por la atracción gravitatoria que ejerce la luna sobre los mares. En consecuencia durante el día se producen altos y bajos niveles de los mares en las distintas zonas costeras.

La energía maremotriz aprovecha estas diferencias, para interponer elementos móviles, que el agua al pasar por ellos, pueden hacer girar aspas que se conectan a generadores y así producir energía eléctrica.

Otro fenómeno capaz de producir energía eléctrica en los océanos es el desplazamiento de las olas, a esta tipo de energía se le conoce como undimotriz.

Con altos precios del petróleo, reducción en la disponibilidad y aumento de la presión por reducir el calentamiento global, los gobiernos y empresas de servicios tiene grandes expectativas en la energía oceánica. El desafío ahora es volcar una acumulación de investigación en una empresa comercialmente viable, que por años se ha mostrado elusiva.

Parece una idea tan razonable que los inventores comenzaron construyendo los primeros modelos de tales generadores varios siglos atrás. Muchos operados como represas almacenan el agua y luego la liberan cuando desciende la marea. Sin embargo, estos diseños quedaron fuera de moda con el advenimiento de la máquina de vapor y otras fuentes de combustible más eficientes. Existen centrales en funcionamiento desde hace décadas. El precedente a las centrales mareomotrices está en los molinos de marea, abundantes en las costas europeas a partir del siglo XI.

La utilización de las mareas como fuente de energía se remonta a los molinos de viento de los que en el Reino Unido se tiene noticias desde el siglo XI. Los primeros molinos de marea aparecieron en Francia y estaban instalados en el centro de un dique

que cerraba una ensenada; así se creaba un embalse que se llenaba durante la pleamar por medio de unas compuertas y durante la bajamar el agua salía y accionaba una rueda de paletas. Hoy en día pueden verse algunos de estos molinos en las costas francesas.

A finales del siglo XIX el progresivo desarrollo de los sistemas eléctricos y el tamaño creciente de las centrales generadoras de energía eléctrica motivaron el abandono progresivo de las fuentes de energía de carácter local, entre otras los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos y los molinos de marea.

Se sabe que el primero que estudió el problema del aprovechamiento de la energía de las mareas, fue el francés Belidor, (Proyecto de las islas Chausey). Las teorías expuestas por Belidor no quedaron en el olvido; otros ingenieros franceses proyectaron una central maremotriz en el estuario de Avranches, que consistía en un dique que cerraba el estuario y aprovechaba la energía de la marea en las correspondientes turbinas; los estudios para este proyecto estaban listos en 1923, pero el proyecto fue abandonado.

Otros países interesados en estudiar las posibilidades de emplear la energía de las mareas para la producción de energía eléctrica fueron Estados Unidos y Canadá. Sus primeros estudios se remontan al año 1919 y posteriormente deciden la implantación de una central mareomotriz en la frontera de ambos países, en la bahía de Fundy, en el río Annápolis, que ofrece mareas, en la región de Minas Basin, con amplitudes de hasta 20m y corrientes de marea de hasta 3m/seg. Sin embargo, los estudios sobre la central fracasaron y cuando se reemprendieron nuevamente en 1964 se pensó en construir dos centrales mareomotrices de una potencia de 500MW, que trabajarían conjuntamente con una central hidroeléctrica de 750MW. En 1965 Canadá realiza nuevos estudios bajo supervisión francesa, proyecto Sogreah, para la instalación de una central de potencia en la bahía de Minas Basin, contemplándose en este proyecto la introducción de los grupos Straflo con alternador periférico.

Central del Rance.- La primera y única tentativa para el aprovechamiento de la energía de las mareas se realizó en Francia, en la río del Rance, en esta zona la amplitud de la marea puede alcanzar máximos de 13.5m, una de los mayores del mundo.

El volumen de agua de mar que puede penetrar en el estuario es del orden de $20,000\text{m}^3/\text{seg}$. Un dique artificial cierra la entrada de la río.

Todos los elementos de la central maremotriz como, generadores eléctricos, máquinas auxiliares, turbinas, talleres de reparación, salas y habitaciones para el personal, están ubicados entre los muros del dique que cierra la entrada del estuario [3].

Fue acabada en 1967 y funciona con un ciclo de doble efecto con acumulación por bombeo. Su dique tiene 700m de largo, 24m de ancho y 27m de alto (15 sobre el nivel medio del mar), 6 compuertas de 15m de longitud y 10m de altura y una esclusa que comunica, para pequeños barcos, el mar con el estuario.

Las turbinas Bulbo son axiales y fueron diseñadas para funcionar en los dos sentidos de marea; tienen el alternador de 64 polos en la prolongación del eje, alojado en el interior de un bulbo, y aprovecha saltos de pequeño desnivel y gran caudal.

Central de Kislay.- Ubicada en el mar de Barentz, Rusia; empezó a funcionar como planta piloto en 1968, siendo la segunda del mundo de esta clase; dispone de una turbina bulbo de 0.4MW. Los módulos de la sala de máquinas y del dique fueron fabricados en tierra y llevados flotando al lugar elegido; fue concebida como banco de ensayos para la instalación maremotriz de Penzhinsk, proyecto que en la actualidad ha sido olvidado [3].

En principio, estos proyectos no tuvieron una buena acogida, debido a que en esa época todo el mundo pensaba que el petróleo podía seguir siendo la forma más rentable de generar energía; sin embargo, dado el giro que tomaron los precios de los crudos y su inestabilidad, hizo pensar que la energía maremotriz podía ser una energía alternativa de futuro, competitiva con la energía nuclear, teniendo en cuenta su carácter inagotable y su poca influencia sobre el medio ambiente; algunos países ya la han introducido en sus planes de desarrollo energético, aunque sin muchas expectativas de futuro.

Los principales parámetros que se deben considerar en un estudio de viabilidad para la construcción de una central maremotriz:

- La longitud del dique
- La superficie del embalse
- El nivel mínimo del agua
- La amplitud de la marea, que es el factor más importante, que justifica la instalación de la central.

Una vez que la situación geográfica de lugar lo permite se construirá un dique con el propósito de crear un estanque artificial para poder manipular el flujo del agua.

Después de tener listo el estanque se selecciona el tipo de turbina que en la actualidad el mas utilizado es el tipo bulbo y strafflo.

1.2 Objetivo

El objetivo de esta tesis consiste en desarrollar un prototipo a escala que permita comprender con mayor claridad el funcionamiento de una central undimotriz y demostrar que es posible aprovechar el movimiento de las olas para generara electricidad, capaz de aprovechar la energía del mar; así como la necesidad de analizar el beneficio la misma.

1.3 Justificación

En la actualidad nos enfrentamos a la necesidad de buscar nuevas formas de obtener energía eléctrica a partir de los recursos naturales, la energía oceánica un enorme potencial y es necesario ayudar a que esta joven industria no se vea frenada por el desconocimiento de sus beneficios. En la actualidad la industria ha tenido un gran interés debido al incremento del costo del petróleo y ven en los océanos una fuente de energía renovable no utilizada y a largo plazo, esta se puede convertir en una de las fuentes de energía de las más competitivas. La forma de convertir el movimiento perpetuó del mar en mercancía de alta demanda es a través de una central undimotriz donde se pueda competir al más alto nivel con las formas de obtención de energía eléctrica ya existentes por lo que en este trabajo se evaluara lo requisitos necesarios para la construcción de una central así como la tenencias de desarrollo de esta tecnología.

1.4 Metodología

La metodología del siguiente trabajo fue la de investigar y documentarse acerca de la información que se conoce de este tipo de energía, familiarizarse con los diferentes dispositivos existentes; después de comprender el mecanismo de los dispositivos proponer y diseñar nuestro propio prototipo.

1.5 Organización de la Tesis

En el capítulo 1. Se da una breve introducción de cómo el hombre a aprovecha el recurso el movimiento de los mares para convertirlo en energía mecánica que el aprovecha. Se menciona algunos proyectos que se probaron en el pasado y por ultimo se identifica los objetivos de este trabajo.

En el capítulo 2. Una explicación de cómo y porque se presenta el fenómeno de las mareas. También se abordara los requerimientos naturales mínimos para que sea viable la construcción de una central maremotriz, así como la infraestructura necesaria para llevar acabo la construcción. Se presenta los múltiples dispositivos diseñados en el pasado para aprovechar la energía del mar a través de las el movimiento de olas.

En el capítulo 3. Se presenta la propuesta de un dispositivo capaz de aprovechar el movimiento de las olas para generara energía eléctrica

En el capítulo 4. Se realizaran las pruebas, experimentación y respuestas del prototipo.

En capítulo 5. Se presentan las conclusiones generales y recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

Energía del mar

2.1 Antecedentes Históricos

Desde la antigüedad es conocida esta técnica, que ya fue aplicada para mover los primitivos molinos de marea egipcios. Su desarrollo histórico fue parecido al de los molinos hidráulicos; en el siglo XIII ya funcionaban algunas ruedas maremotrices en Inglaterra y en el siglo XVIII aparecen varias instalaciones para moler grano y especias tanto en Francia como en EE.UU.

El pionero de la energía mareomotriz fue en 1881 D'Arsonval, aunque la primera central de este tipo no se construyó hasta 1930 en Cuba, central que tuvo una corta vida.

A partir del año 1920, se realizaron los primeros estudios en profundidad en Francia, URSS, Canadá y EE.UU., alcanzándose los primeros resultados prácticos en la construcción de centrales mareomotrices en Francia (1966) y la URSS (1968).

La primera central mareomotriz fue la de Rance, en Francia, que estuvo funcionando casi dos décadas desde 1967. Veinticuatro generadores eléctricos accionados por la misma cantidad de turbinas hidráulicas, llamadas reversibles o de doble efecto, giran en ambos sentidos a 5 700rpm y logran una potencia máxima de 240MW, convirtiendo la energía de 20 000m³/s de agua salada en el momento de máxima altura. Estas turbinas, además, funcionan como bombas, cuyo objetivo es aumentar el nivel del agua en los sentidos río-mar y mar-río, para incrementar la efectividad de la instalación.

Cada máquina está ubicada en el interior de una cámara que se comunica con un tubo de acero, que permite cargar y descargar el mar al embalse y viceversa, mediante otro tubo se permite el acceso del personal de mantenimiento. Se estima que el costo de la instalación es 2.5 veces el de las centrales hidroeléctricas de ríos.

Proyecto Kislogubskaya, de Rusia esta central experimental, ubicada en el mar de Barentz, con una capacidad de 400kW, fue la segunda de esta clase en el mundo. Se empleó un método empleado en Rance: cada módulo de la casa de máquinas, incluidos los turbogeneradores, se fabricaron en tierra y se llevaron flotando hasta el lugar elegido y se hundieron en el lecho previamente elegido y preparado. Se puso en marcha en 1968 [3].

El único problema es el elevado costo inicial por kW de capacidad instalada, pero se deberá tener en cuenta que no requiere combustible, no contamina la atmósfera y su vida útil se calcula un siglo.

Por todo ello, sería interesante retomar el estudio de éstas y otras energías renovables no convencionales para asegurar un futuro predecible.

En 1979 se montó una planta de producción de energía eléctrica de potencia 15kW usando energía mareomotriz en la costa de Hawaii; esta planta fue un prototipo de ensayo de la central OTEC-1 en funcionamiento en la actualidad y de potencia instalada 1MW, ambas funcionan con un ciclo cerrado. También funciona en Japón otra central con la misma potencia que la OTEC-1.

2.2 Aprovechamiento de la energía del mar

Las mareas de los océanos constituyen una fuente gratuita, limpia e inagotable de energía. Los océanos, con una superficie de 361 millones de km² y un volumen de 1370 km³, actúan como sistemas colectores y de almacenamiento, lo cual se manifiesta de diversas formas, olas (energía eólica), y gradientes térmicos, gradientes salinos y corrientes marinas, (energía solar mareomotérmica). Las más estudiadas son las debidas a las mareas, olas y térmica marina, estando las de las corrientes y gradientes salinos mucho menos desarrolladas.

A estas formas de energía hay que sumar la de las mareas (energía mareomotriz) debida a la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol, y a la rotación de la Tierra, $3 \cdot 10^6$ MW.

Los mares y los océanos son una fuente de energía prácticamente inagotable. Muchos han sido los proyectos propuestos para aprovechar el enorme potencial energético contenido en el movimiento perpetuo de sus aguas, pero la mayoría no se han realizado a causa de los efectos corrosivos del agua salada sobre las partes metálicas, de las condiciones atmosféricas adversas, las dificultades de transporte de energía producida y los elevados gastos que supone.

Las principales fuentes para aprovechar la energía del mar son:

Energía de las mareas:

Las mareas son un movimiento cíclico alternativo de ascenso y descenso del nivel del agua del mar, producto de la acción gravitatoria de la Luna y el Sol y favorecido por la poca viscosidad del agua. Este movimiento de subida y bajada del nivel del agua es aprovechado en las centrales mareomotrices para generar energía eléctrica.

Energía de las olas:

La principal fuente de energía de las olas es el sol. El calentamiento desigual de la superficie terrestre genera viento, y este, al pasar por encima del agua, genera olas.

Los dispositivos que se están experimentando o que están en proyecto son muchos, aunque la mayoría utilizan el mismo principio: la ola presiona sobre un cuerpo que comprime el fluido (líquido o gas) el cual acciona una turbina.

Energía térmica de los océanos:

La diferencia de temperatura entre las capas superficiales y las profundidades de los océanos se puede aprovechar para desencadenar un ciclo termodinámico y obtener energía eléctrica [5].

2.3 Fenómeno de la marea

El primero que estudió el fenómeno de las mareas fue Newton, quien analizó el equilibrio de un elemento de agua oceánica sometido a la gravedad terrestre y a la atracción solilunar. Un modelo de este se muestra en la figura 2.1.

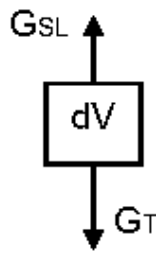


Figura 2.1 Fenómeno de la marea de acuerdo a Newton

De esta forma, logró determinar un valor que hoy se denomina "marea estática", y que casi, nunca coincidía con las mediciones reales en ninguna parte.

Solamente cuando Lagrange analizó el fenómeno desde el punto de vista oscilatorio, al considerar en vez del equilibrio estático, los movimientos resultantes de considerar a la masa oceánica como un cuerpo elástico sometido a fuerzas de origen gravitatorio con componentes armónicas.

En efecto, considerando la deformación de la masa elástica supuesta continua y concéntrica con la esfera terrestre, también considerada continua y lisa, el esquema es el que se muestra en la figura 2.2, exagerando el espesor de la capa de agua y las amplitudes de las deformaciones [4].

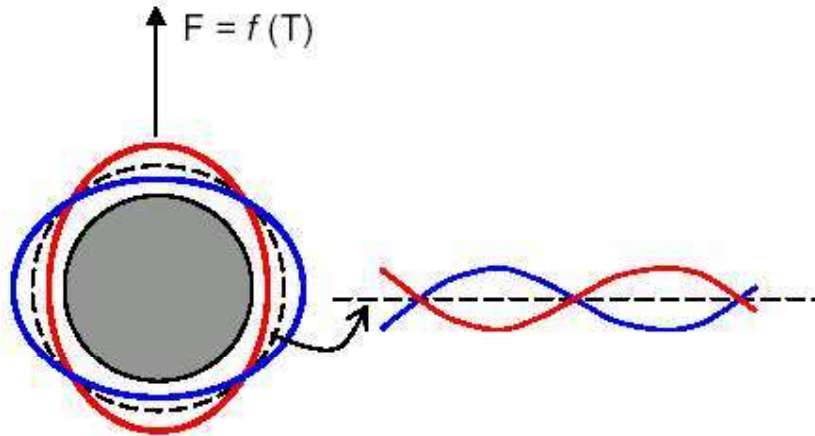


Figura 2.2 Deformación de la masa elástica

Rectificando la línea estática de nivel de agua (trazos) se nota entonces que el fenómeno se trata de oscilaciones de una masa elástica.

De esta forma no solamente se puede calcular valores de mareas más cercanos a la realidad, sino que ese mismo fenómeno alcanza para explicar el porqué de algunas anomalías observadas en algunos puntos de la Tierra, como ser unas amplitudes de varios metros en algunas regiones, una sola marea diaria en otras, etc.

Ello es así porque la masa de agua no forma una capa concéntrica y continua sino que posee distintos recintos, con distintas formas y profundidades, lo cual implica en un medio elástico modos propios de oscilación.

En algunos casos, dichos fenómenos resonantes pueden combinarse con otros factores, como por ejemplo corrientes marinas, dando origen a fenómenos más complejos.

La marea es la fluctuación periódica del nivel de los océanos, debida principalmente a la atracción gravitatoria de la Luna y en menor cuantía del sol, (la luna ejerce una atracción 2.2 veces la del sol), y al movimiento de rotación de la Tierra, (aceleración de Coriolis); otros factores son la forma y fisionomía del relieve de las costas y del fondo, los fenómenos meteorológicos, etc. La aceleración que produce el efecto de marea aumenta con la masa y disminuye con el cubo de la distancia. Con relación a la Tierra, y teniendo en cuenta las distancias y las masas, sólo el Sol y la Luna son capaces de

producir mareas apreciables; el Sol, más distante, influye por su masa; la Luna, de masa mucho menor, por su proximidad a la Tierra.

La masa del sol es del orden de 27 millones la de la Luna, pero se encuentra 390 veces más lejos, por lo que la contribución del Sol a la marea es $27 \cdot 10^6 / 390 = 0.45$ veces la contribución lunar.

El fenómeno es prácticamente idéntico, tanto si el punto sometido a la acción de la marea, se encuentra orientado hacia el astro, como si se encuentra en la parte opuesta.

La causa de las mareas deriva de la aplicación de las dos fuerzas, atractiva y centrífuga (La fuerza centrífuga originada por el movimiento de rotación de la Tierra al recorrer su órbita alrededor del centro de gravedad del sistema Tierra-astro es la misma en cualquier punto del planeta, ya que no depende de la distancia. La fuerza centrífuga aumenta la altura del nivel del mar que está más lejos de la Luna, al tiempo que descende el nivel del mar en la parte contraria.), que en el centro de gravedad de la Tierra se neutralizan, es decir, la atracción de la Luna queda compensada por la fuerza centrífuga engendrada por la revolución en torno al centro de gravedad del sistema Tierra-Luna, ya que de no ser así, la atracción provocaría un acercamiento progresivo entre ellas. Si la Tierra no girara alrededor de su eje, las mareas serían estáticas.

2.3.1 Tipos de mareas

Debido a la rotación de la Tierra se obtienen, en cada punto del océano, cada día, dos pleamares y dos bajamares, lo que se conoce como **marea tipo semidiurno**.

Marea tipo diurno: Con una pleamar y una bajamar en el transcurso del día lunar. Considerando que el día lunar es de 24 horas 50 minutos se producirá una pleamar y una bajamar cada 12 horas 25 minutos.

Diurnas irregulares: Con dos ciclos por día lunar pero con marcadas diferencias en las alturas y en los períodos de tiempo.

Mareas mixtas: Régimen de tipo intermedio, durante un día lunar se presenta dos pleamares y una bajamar o dos bajamares y una pleamar.

Mareas vivas o de sicigia: Cuando la posición de los tres astros, sol, luna, tierra se encuentran sobre una misma línea se suman las fuerzas de atracción de la luna y el sol, por lo que se producen las pleamares de mayor valor y en consecuencia las bajamares son más bajas que las promedio.

Cuando la luna se encuentra entre la tierra y el sol se la denomina de conjunción (luna nueva) y cuando la tierra se encuentra entre la luna y el sol se las llama de oposición (luna llena). Dentro de las mareas de sicigia hay dos con valores máximos y son las que se producen en los equinoccios de otoño y primavera, o sea cuando el sol y la luna se encuentran sobre el ecuador. A mayor amplitud de marea (diferencia entre pleamar y bajamar) corresponden mayores corrientes por el volumen de agua a trasladarse en el mismo tiempo.

Mareas muertas o de cuadratura: Cuando la luna y el sol forman un ángulo de 90° con centro en la tierra, la luna se encuentra en cuarto creciente o menguante (en el caso de creciente se asemeja a la letra C y cuando parece una D cuarto menguante). En este caso las fuerzas de atracción se restan por lo que la mayor atracción de la luna se ve disminuida por efecto de la del sol y se producen mareas de menor magnitud a las mareas promedio. En consecuencia las corrientes serán también menores por ser menor el volumen de agua a trasladarse en el mismo tiempo [15].

Las mareas están sometidas a una fluctuación rítmica de su nivel y a una fluctuación en forma de corrientes, como son:

- a) La corriente que acompaña a la llegada de la pleamar, máxima elevación, que se conoce como flujo.
- b) La corriente que acompaña a la aparición de la bajamar, mínima elevación, que se conoce como reflujos y es más breve en tiempo que la primera.

Dentro del estudio de mareas existen los llamados puntos anfifrómicos, que son aquellos en los que la amplitud de la marea es nula, mientras que las corrientes de marea son máximas.

Las ondas semidiurnas están influenciadas por la componente lunar, que tiene un período de 12.42 horas y la solar de 12 horas, por lo que entre ambas existe una diferencia de período de 25.25 minutos lo que implica un retraso entre ambas ondas de 50.5 minutos al día, o un retraso de 6.23 horas cada 7.4 días, lo que equivale al semiperíodo de la onda, es decir, cada 7.4 días las dos ondas están en concordancia de fase y sus acciones se suman, mientras que al cabo de otros 7.4 días se encuentran en oposición, deduciéndose de esto la evolución característica de la oscilación semidiurna que consta de grupos que se alternan con amplitudes variables entre un máximo y un mínimo cada 7.4 días. A esto habría que añadir la influencia de la órbita lunar, elíptica, (que origina una onda elíptica lunar) de forma que cada 13.75 días la Luna se encuentra más cerca o más lejos de la Tierra, provocando un exceso o un defecto de atracción que modifica la evolución prevista con la composición de las ondas anteriores. Se ha observado que las ondas semidiurnas son más acusadas cuando la Luna y el Sol están más próximos al Ecuador.

Las ondas diurnas están influenciadas por otras componentes, como la lunar diurna con un período de 25.82 horas, la solar diurna (24.07 h) y la onda de declinación mixta Luna-Sol (23.93 horas), que se interfieren entre sí formando la evolución característica del grupo de estas ondas. Las ondas diurnas son máximas cuando la declinación lunar tiene un valor extremo y mínimas cuando la Luna está en el Ecuador; tienen amplitudes máximas en los solsticios y en los equinoccios.

En las mareas mixtas, la onda semidiurna puede predominar en las sicigias, mientras que en las cuadraturas predomina la onda diurna. La amplitud máxima se produce poco después de la fase de Luna nueva o luna llena (sicigias), y la mínima poco después de los cuartos creciente y menguante (cuadraturas).

Análisis armónico de las mareas.- La variación del nivel del agua del mar observado durante una marea u onda total, viene dado por la suma de muchas ondas senoidales simples del tipo:

$$h = a \cos (w t + \varphi)$$

Donde:

h es la altura de la marea

a es la amplitud de la marea

w depende de las condiciones astronómicas, siendo constante en todo momento y lugar

φ la fase de cada onda, que no dependen de las condiciones astronómicas y que son variables de un lugar a otro.

Cuando se conocen se puede establecer la evolución de la marea para cada lugar y tiempo [3].

2.4 Funcionamiento de una central maremotriz

Como hemos visto las mareas se producen por la atracción gravitatoria que ejerce la luna sobre los mares. En consecuencia durante el día se producen altos y bajos niveles de los mares en las distintas zonas costeras.

La energía mareomotriz aprovecha estas diferencias, para interponer elementos móviles, que el agua al pasar por ellos, pueden hacer girar aspas que se conectan a generadores y así producir energía eléctrica. En la figura 2.3 se muestra un esquema básico de una central maremotriz .



Figura 2.3 Esquema de una central maremotriz

El funcionamiento de este tipo de central de generación de energía eléctrica se enuncia en los siguientes puntos:

-Al subir la marea las compuertas se abren ingresando el agua de mar al embalse.

-En el momento que el agua llega al nivel máximo del embalse, se cierran las compuertas.

-Se produce la marea baja y el nivel al lado contrario del embalse desciende.

-Al producirse la máxima diferencia entre el embalse y el nivel del mar, se abren las compuertas de las turbinas para que el agua pase a través de ellas generando electricidad.

-Como una disposición de este tipo proporciona energía sólo durante 3 horas, dos veces al día, se han dispuesto diversas variaciones de este esquema como medio de generar potencia de forma más continúa [13].

2.5 Ciclos de funcionamiento de la una central maremotriz

En esta sección se describen los ciclos de funcionamiento de una central, los cuales son:

Ciclo de simple efecto.- Se dispone de un embalse único, siendo los modos operativos los siguientes:

a) Generación durante el reflujó de marea, (bajamar). El llenado del embalse se efectúa con las compuertas abiertas y el vaciado con turbinación.

b) Generación durante el flujo, (pleamar). El llenado del embalse se efectúa con turbinación y el vaciado con las compuertas abiertas. Es menos eficiente que el anterior; porque el embalse trabaja con niveles más bajos y la capacidad de almacenamiento es menor. En consecuencia generan sólo durante la bajamar, vaciándose el embalse, o sólo durante la pleamar, llenándose el embalse; estas operaciones requieren de una turbina hélice de flujo axial y alta velocidad específica.

Durante el vaciado del embalse se realiza lo siguiente:

- a) Cuando sube la marea se abren las compuertas y el embalse se llena.
- b) Cuando comienza a bajar la marea se cierran las compuertas y se espera un tiempo, del orden de 3 horas, para alcanzar una diferencia de nivel adecuada entre el mar y el embalse.
- c) A continuación, durante 5 ó 6 horas, se hace pasar el agua por las turbinas generando energía eléctrica.

En los ciclos de simple efecto que funcionan con vaciado del embalse sólo se genera energía, cada día, durante dos períodos de unas 10 a 12 horas en total, que además se irán produciendo en horas diferentes cada día. En la figura 2.4 se muestra un esquema de funcionamiento de esta central basado en el ciclo de simple efecto.

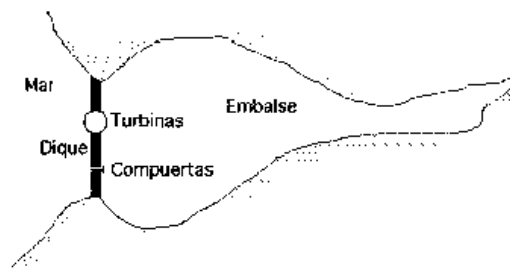


Figura 2.4 ciclo simple

Si el turbinaje se realizase durante el llenado del embalse, los tiempos de generación utilizando este ciclo son del orden de 4 a 5 horas, con tiempos de espera o de Bombeo de 3 horas, funcionando un total de 8 a 10 horas. Fundy y Kislaya son centrales de este tipo de ciclo.

Ciclo de doble efecto con turbinas reversibles.- La generación de energía se efectúa con ambas mareas, que exige que las turbinas operen eficazmente con un determinado

caudal de agua en cualquier dirección, funcionando tanto durante el llenado, como durante el vaciado del embalse.

Se pueden utilizar dos tipos de turbinas:

- a) Reversibles
- b) No reversibles, con un sistema de canales y compuertas; es un procedimiento complejo y caro.

La energía utilizable es menor debido a que las diferencias de niveles entre el embalse y el mar son menores que en los ciclos de simple efecto, reduciéndose el rango de variación del nivel embalsado, y disminuyendo también el rendimiento al no ser posible optimizar las turbinas y el caudal, pero aún así el factor de utilización de la planta es mayor, lo que proporciona un 18% más de energía que en los casos de simple efecto.

Los tiempos de funcionamiento son del orden de 6 a 7 horas por marea, lo que supone entre 12 y 14 horas diarias de generación de energía, con tiempos de espera entre 2 y 3 horas por marea. En la figura 2.5 se ilustra el ciclo de doble efecto con turbinas reversibles.

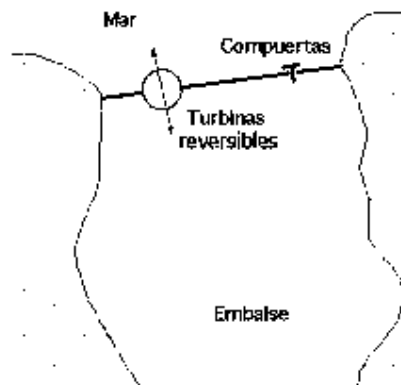


Figura 2.5.- Embalse con turbinas de doble efecto

Ciclos de acumulación por bombeo.- Generan energía con ambas mareas y disponen de algún tipo de almacenamiento por bombeo, lo que obliga a utilizar turbinas que sean capaces de funcionar no sólo como tales, sino también como bombas, cuando sean accionadas por los alternadores.

El nivel de generación y la flexibilidad operativa se mejoran, lo que proporciona una mayor eficiencia económica, es decir, permiten un aprovechamiento más racional y rentable de la central, pudiendo llegar el aumento en la generación al 10%. Las turbinas tienen un costo mayor, y sería necesario incluir, a veces, un equipo para el arranque de la bomba, ya que en algunas situaciones, como se ha comprobado en el Rance, no arrancarían por sí solas. Es más económico y ambientalmente aceptable limitar la generación a la fase de reflujos (bajamar).

Ciclos múltiples.- Utilizarían varios embalses, con lo que se podría generar energía de una forma más continua a lo largo del día; el costo es más elevado, ya que exige una obra civil muy costosa, lo que les ha hecho prácticamente inviables.

El proyecto Cacquot en la bahía del Mt-St-Michel, con mareas de 15m de amplitud, implicaba diques de 55km con alturas de 30 a 40m para almacenar en 2 estanques de 1100km², caudales que penetrarían por las compuertas a razón de 500.000m³/seg, generando entre 30 y 40TWh año, apoyándose en las islas Chausey. Se estimó en 10 años su construcción, pero fue abandonado.

Los principales parámetros a considerar en un estudio para justificar si es viable la construcción de una central maremotriz son:

- La longitud del dique
- La superficie del embalse
- El nivel mínimo del agua
- La amplitud de la marea, que es el factor más importante, que justifica la instalación de la central

Así, por ejemplo, la amplitud media de la marea tiene que ser superior a 5 metros para asegurar la viabilidad económica de la central. La evaluación de la rentabilidad exige un

proceso de optimización y predicción de las condiciones de funcionamiento de la planta, así como los efectos de barrera que la implantación del dique provoca no sólo en las mareas existentes en el emplazamiento, sino en el propio embalse [3].

2.6 Tipos de turbinas para mareas

Turbina Pelton: Consta de un disco circular que tiene montados en su periferia unas paletas en forma de doble cuchara y de un inyector que dirige y regula el chorro de agua que inciden sobre las cucharas, provocando el movimiento de giro de la turbina.

La turbina debe su nombre a Lester Allan Pelton (1829-1908). La clasificación más general que puede hacerse de las turbinas Pelton es un tipo de eje horizontal y tipos de eje vertical. Existen otras diversiones que toman en cuenta el número de inyectores por rueda o el número de rotores montados en un mismo eje.

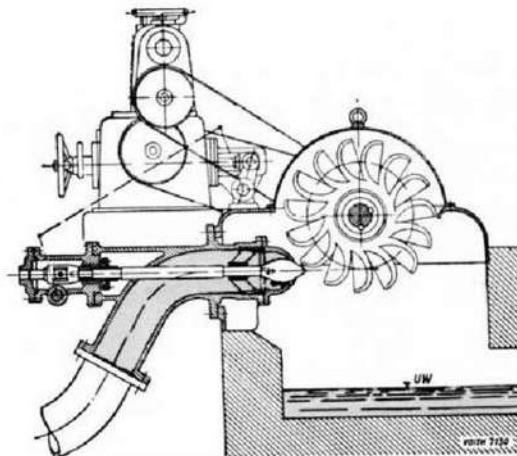


Figura 2.6 turbina Pelton

Francis.-caracterizada por que recibe el flujo de agua en dirección radial, orientándolo hacia la salida en dirección axial. En la actualidad, es la turbina hidráulica típica. Lleva este nombre en honor al ingeniero James Bichano Francis (1815-1892). Se compone de: Un distribuidor que contiene una serie de álabes fijos o móviles que orientan el agua hacia el rodete. Un rodete formado por una corona de paletas fijas, torsionadas de forma que reciben el agua en dirección radial y lo orientan axialmente.

Una cámara de entrada, que puede ser abierta o cerrada de forma espiral, para dar una componente radial al flujo de agua. Un tubo de aspiración o de salida de agua, que puede ser recto o acodado y se encarga de mantener la diferencia de presiones necesaria para el buen funcionamiento de la turbina.

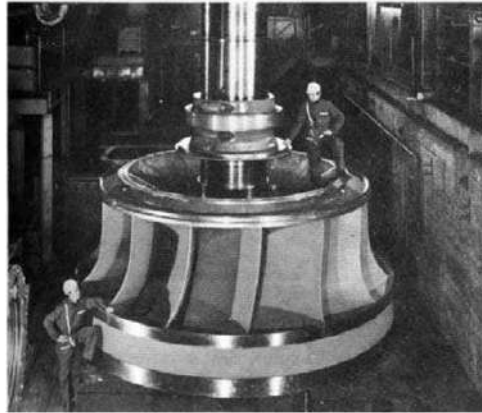


Figura 2.7 Turbina Francis

La Turbina Kaplan.- Es una turbina con 4 o 5 palas fijas en forma de hélice de barco con álabes ajustables, de forma que la incidencia del agua en el borde de ataque del álabes pueda producirse en las condiciones de máxima acción, cualesquiera que sean los requisitos de caudal o de carga. Esta turbina debe su nombre al ingeniero Víctor Kaplan (1876-1934). Al tener este diseño, la turbina puede funcionar como generador eléctrico o motor; ya que, si el nivel de agua en el río es bajo, se puede bombear agua del mar hacia este por medio de estas turbinas. Al subir el nivel del agua se puede usar como riego en el día y a la noche se deja circular el caudal de manera normal para la generación de energía. Por estas grandes ventajas, es la turbina más usada para este tipo de energía.

Turbina Bulbo.- Son un modelo especial de las Kaplan. Son aptas para aprovechar saltos de muy poca altura y gran caudal. El alternador queda dentro de la envolvente.

El agua que circula entre esta y la otra pared concéntrica de mayor diámetro, pasa en primer lugar por los canales que forman unas aletas guía fijas, que sirven de soporte estructural, a continuación por el canal de las aletas guía pivotadas para la regulación, y por último atraviesan un rodete tipo Kaplan. El conjunto queda sumergido como si fuera

un submarino. Se accede a él a través de un pozo con diseño exterior aerodinámico para evitar obstaculizar el paso el agua.

La velocidad específica de una turbina bulbo es muy alta de entre 600 y 1150, solapándose parcialmente con las turbinas tipo Kaplan. Su número de revoluciones es pequeño, por lo que obliga a tener un alternador con un gran número de polos, y en consecuencia un gran diámetro [10].

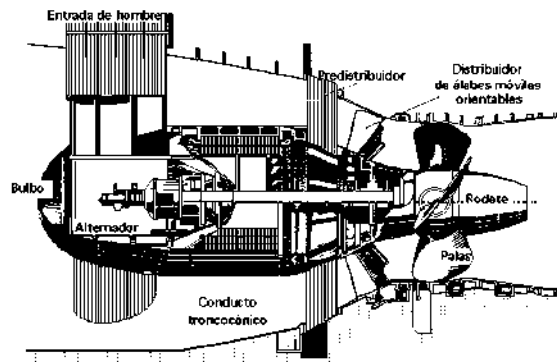


Figura 2.8 Turbina tipo Bulbo

La estructura de luna central es muy importante. Se tienen en dos tipos:

Fijas: son las que se instalan en los estuarios de los ríos. Se coloca en todo su largo, varias turbinas. Si el cause del río es muy grande, se suelen poner esclusa para dejar pasar un poco de agua.

Flotantes: Estas centrales son las que aprovechan las energías de las olas. Cabe destacar que los componentes de estas centrales son diferentes, por eso las mencionamos a continuación:

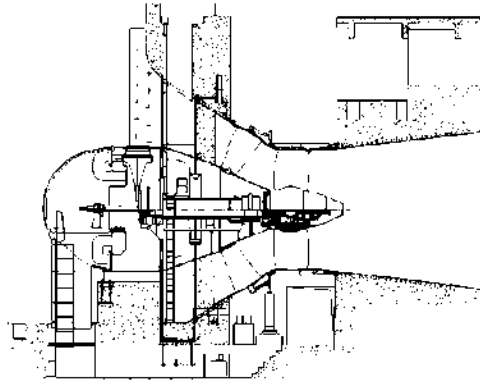


Figura 2.9 Turbina bulbo Montada en un Dique

En estas instalaciones, el conjunto máquina motriz - generador, recibe el nombre de grupo-bulbo. En esencia, se asemeja a un submarino, en cuyo interior se encuentra alojado un generador y los equipos correspondientes, y la hélice, sin dejar de ser tal, corresponde a una turbina hidráulica del tipo Kaplan de eje horizontal o inclinado.

Las turbinas grupo _bulbo son las más utilizadas en centrales mareomotrices por las siguientes razones:

- a) La utilización de un multiplicador de velocidad permite que el alternador no sólo gire más rápido, sino que también reduzca su diámetro y, por tanto, el tamaño del Bulbo que condiciona en general, al grupo. Además su empleo permite la utilización de un alternador más clásico, de mayor rendimiento y de un precio más bajo, rentabilizando las instalaciones de baja altura, que son las de mayor interés para las centrales mareomotrices.
- b) El funcionamiento de los grupos a velocidades a velocidad variable utilizando unos convertidores estáticos de frecuencia a potencia total o potencia nominal, que permita el desembarque automático del alternador cuando la velocidad pase del umbral fijado lo que limitara la velocidad de embalamiento del alternador.

Turbinas tipo strafflo

Son turbinas de flujo rectilíneo, de volumen reducido que conduce a una considerable economía en cuanto al costo de las obras civiles.

Las trayectorias de las partículas de fluido son líneas rectas paralelas al eje. Esencialmente un “molino de viento” introducido en una zona de corrientes de agua producidas por la subida y bajada de la marea [10].

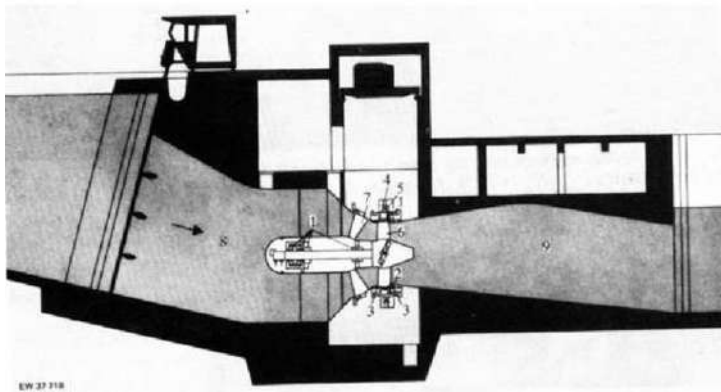


Figura 2.10 Tipo de turbina strafflo

2.7 Tipo de turbinas por las olas

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

Son muchas las modalidades OWCs que permiten obtener energía del oleaje, aunque no está todavía claro cuáles son las opciones más favorables, realizándose el aprovechamiento de la energía de las olas en base a algunas de las siguientes metodologías.

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

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

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

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

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

Técnicas de utilización energética del oleaje.- Las técnicas de utilización energética del oleaje aprovechan estos fenómenos básicos que se producen en las olas, y son:

- a) **Empuje de la ola.**- En aguas poco profundas la velocidad horizontal de las olas no varía con la profundidad; la energía de las olas se puede absorber mediante un obstáculo que transmite la energía a un pistón; es un sistema poco usado, figura 2.11

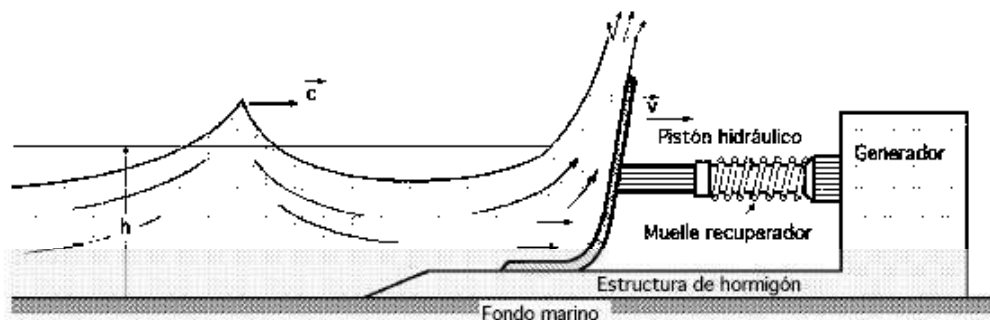


Figura 2.11 Aprovechamiento del empuje de la ola; por un pistón

b) **Variación de la altura de la superficie de ola.**- Situando estructuras flotantes que se mueven con las olas, sintonizadas de manera que puedan captar la su energía. Se dispone de un gran número del mismo para captura la energía, de forma similar la de un receptor de ondas de radio, ya que se basan en cualquier proceso que pueda generara olas, también sirve para extraer su energía, figura 2.12

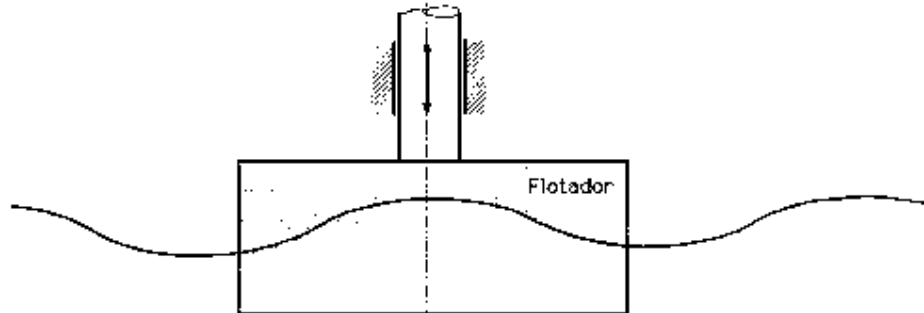


Figura 2.12 Aprovechamiento de la variación de la altura de la superficie de la ola

c) **Variación de la presión bajo la superficie de la ola.**- Son los sistemas de columna oscilante; consisten en una cámara abierta al mar, que encierra un volumen de aire que se comprime y expande por la oscilación del agua inducida por el oleaje, figura 2.13; el aire circula a través de una turbina que puede ser bidireccional. Se les puede considerar aparatos de primera generación.

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

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

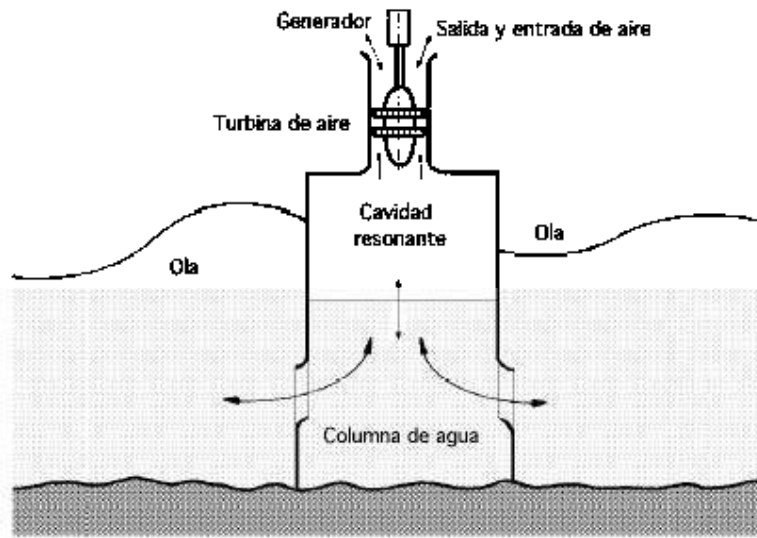


Figura 2.13 Cavidad o columna resonante

Totalizadores o terminadores

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

OWC Rectificador Russel.- Es un totalizador pasivo; consiste en una gran estructura tipo depósito construida sobre el lecho marino, que consta de dos cuerpos o tanques, uno superior y otro inferior, separados del mar por unas compuertas. Las compuertas superiores se abren con la cresta de la ola, penetrando grandes cantidades de agua en el tanque superior, mientras que las compuertas inferiores permiten la salida del agua del tanque inferior con el valle de la ola; ambos tanques están comunicados por una turbina la cual funciona al hacerse el trasvase de agua del tanque superior al inferior, de acuerdo con el movimiento de las olas, figura 2.14.

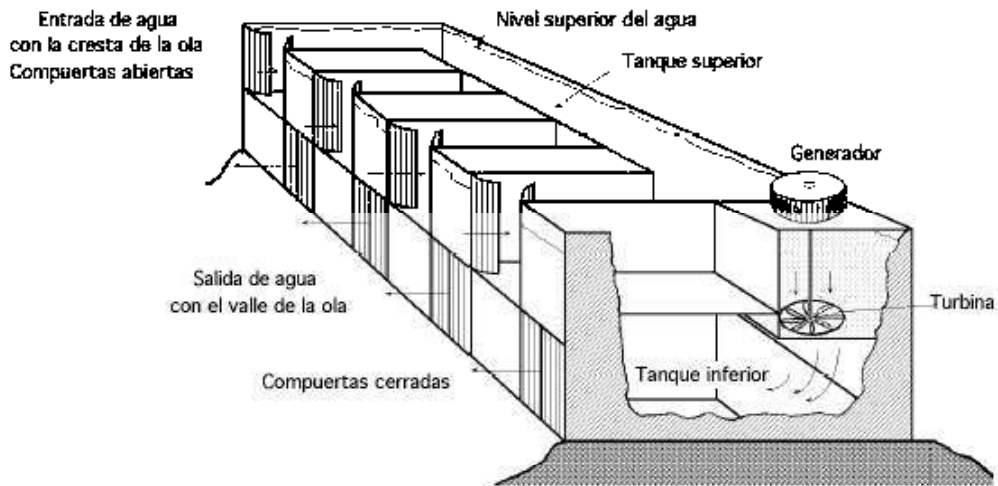


Figura 2.14 Rectificador de Russell.- Formado por módulos que se instalan en el fondo del mar, paralelos al avance de las olas. Cada módulo consta de dos cajas rectangulares, una encima de la otra. El agua pasa de la superior a la inferior a través de una turbina.

OWC péndulo.- El péndulo es un dispositivo apto para ser instalado en un rompeolas. Consiste en una cámara fabricada de hormigón de forma que el frente hacia el mar está provisto de una placa rígida de acero, articulada en su parte superior, que puede oscilar ligeramente, figura 2.15. En el interior de la cámara, de una profundidad del orden de un cuarto de longitud de ola, se produce una ondulación estacionaria que mueve la placa, cuyas oscilaciones se transmiten y se absorben por un dispositivo oleohidráulico, estimándose la eficiencia primaria de este dispositivo (olas-aceite) en un promedio del 35%, y la eficiencia total en un 20%; para olas regulares, de periodo igual al periodo natural del péndulo la eficiencia puede llegar al 100%. En la planta piloto Muroran (Japón) se han observado eficiencias del orden del 50%.

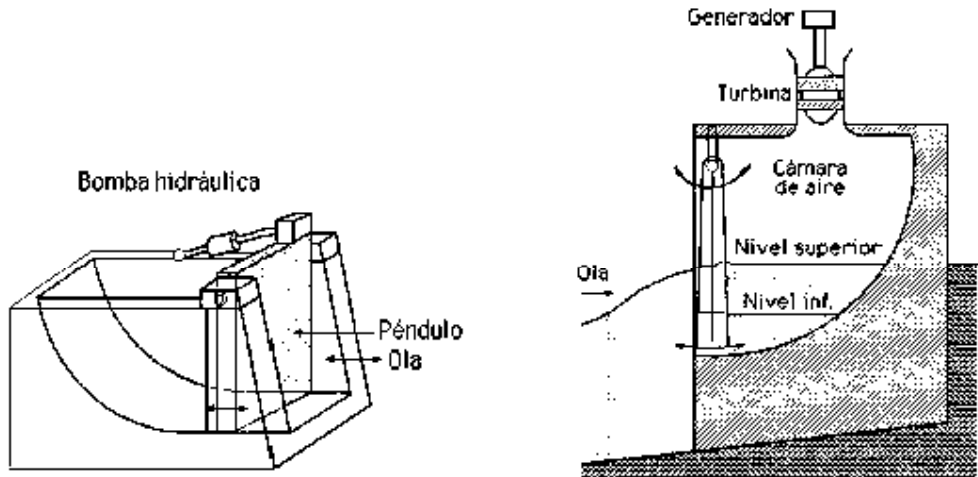


Figura 2.15 Péndulos OWC

OWC duck o Pato Salter.- Se puede considerar como un totalizador activo para el aprovechamiento de las olas a gran escala en altamar, Figura 2.16; desarrollado en la década de los 70, consiste en un flotador alargado cuya sección más estrecha se enfrenta a la ola con el fin de absorber su movimiento lo mejor posible, mientras que su parte posterior es cilíndrica, para evitar pérdidas de energía por rozamiento. Los flotadores giran bajo la acción de las olas, lentamente, alrededor de un eje cuyo movimiento de rotación acciona una bomba de aceite que se encarga de mover una turbina.

Básicamente consiste en una estructura flotante, tal como se indica en la figura 2.16; el sistema consiste en péndulos invertidos, articulados en su parte inferior y montados sobre un eje que permite movimientos en dirección del oleaje, en la que una parte actúa como flotador de balanceo manteniendo una cierta rigidez, es decir, no se ve influenciada por las olas permaneciendo fija, mientras que la parte activa consiste unos flotadores en forma de leva que se mueven accionados por el ritmo de las olas, creándose en los mismos un movimiento oscilatorio, que acciona unos sistemas olehidraulicos (movimiento alternativo) conectados a una turbina, originando el giro del eje de la misma y, por lo tanto, la generación de energía.

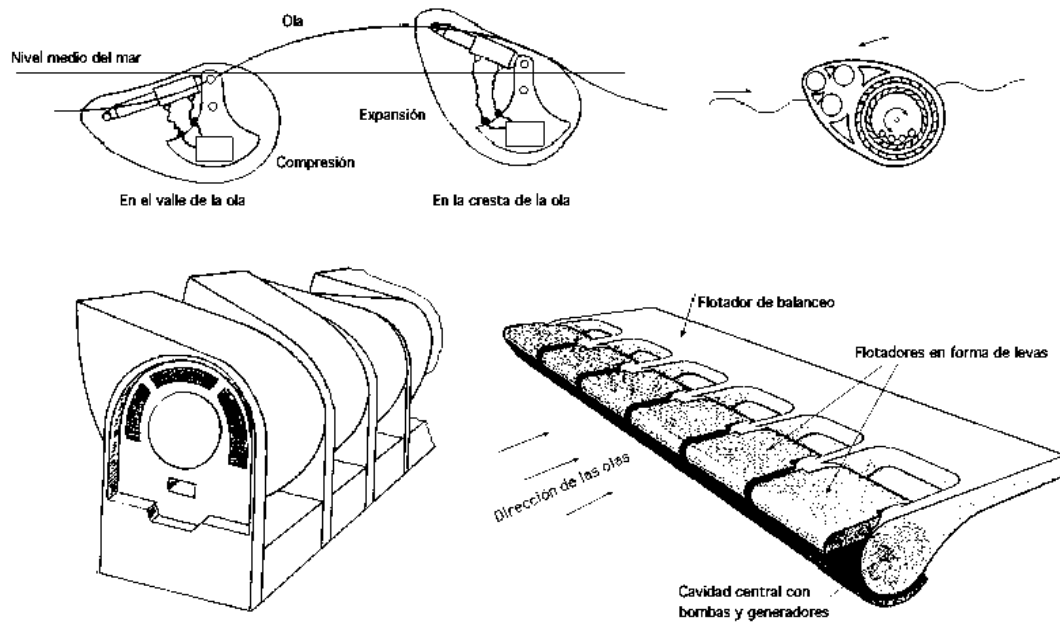


Figura 2.16 Diversos esquemas de Pato Salter

El módulo de una supuesta central podría estar formado por 54 cilindros flotantes de hormigón, de 14 metros de diámetro y 90 metros de longitud, de 11,000 toneladas de peso cada uno, anclados a 100 metros de profundidad.

Sobre cada uno de los cilindros vienen montados dos cascos, los ducks, que pueden rotar alrededor de los cilindros en respuesta a las olas.

Una planta de 2GW estaría conformada por 8 módulos con un total de 864 Ducks, y una longitud de 38.9km; cada Duck estaría provisto, en su interior, del equipo mecánico y eléctrico propio para la generación de electricidad. Para este sistema la conversión secundaria se realiza por un sistema hidráulico de aceite.

Una de las características del Duck sería una alta eficiencia en la conversión primaria, alcanzando casi el 100% en condiciones óptimas.

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

Una planta que funcionase con este sistema constaría de 276 módulos o cilindros; cada cilindro mediría 100 metros de longitud y 16 metros de diámetro; su parte superior estaría situada a 6 metros de la superficie del agua, y anclada a 40 metros de profundidad, por lo que el cilindro totalmente sumergido, no tiene su estructura sometida a fuerzas excesivas durante las tormentas, figura 2.17.

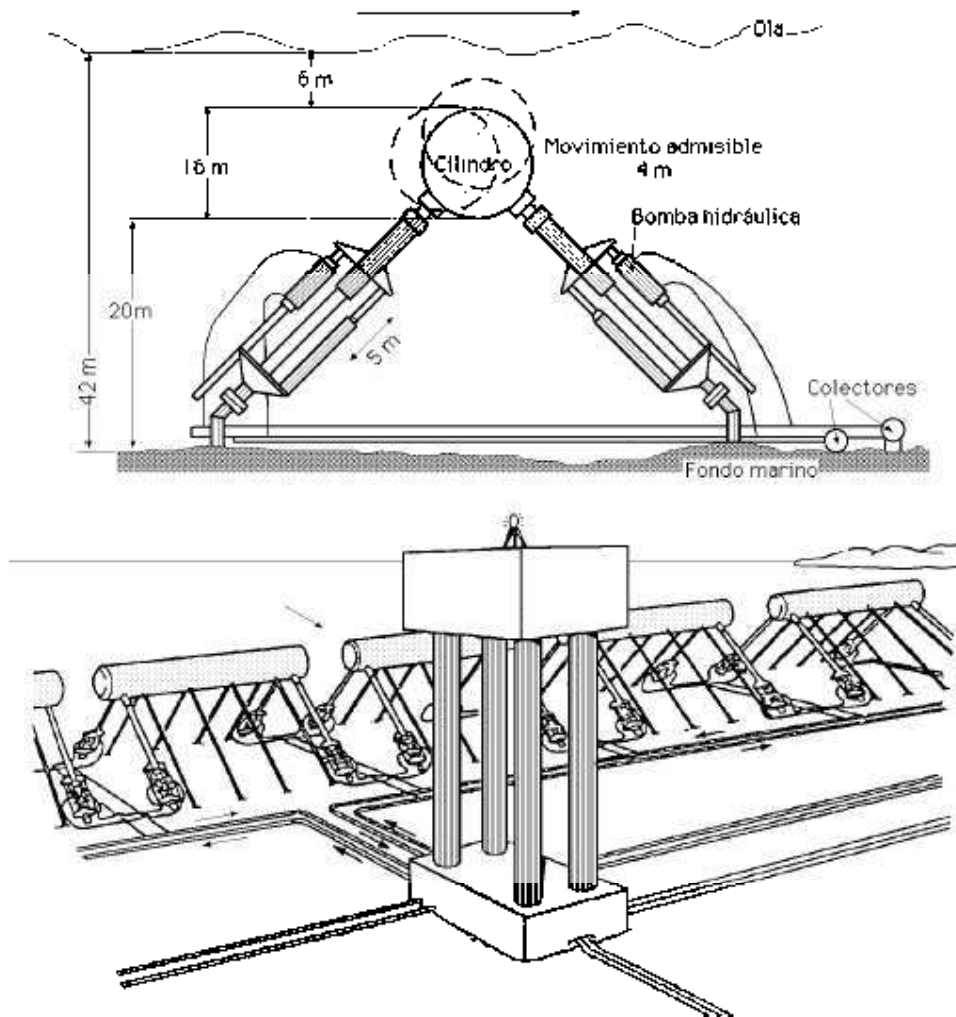


Figura 2.17 Cilindro Bristol.

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

El medio de bombeo, agua del mar, sería transportado por tuberías de 1.2m a seis plataformas por encima del nivel del mar, cada una equipada con tres turbinas Pelton de 120MW.

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

OWC Raft o Balsa Cockerell.- Los Rafts son gigantescas plataformas flotantes, articuladas entre sí, (dos o más), unidas mediante mecanismos hidráulicos (cilindro-émbolo), que reciben el impacto de las crestas de las olas, de forma que los movimientos de giro parcial de los flotadores accionados por ellas, se aprovechan para mover un fluido mediante el sistema (cilindro-émbolo) citado, colocado en las articulaciones que une los flotadores (movimiento alternativo), figura 2.18, accionando el fluido a presión resultante una turbina.

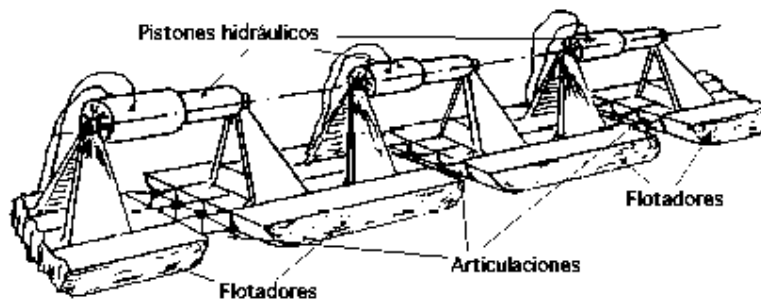


Figura 2.18 Balsa Cockerell

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

El número óptimo de flotadores es de 3 y el tamaño óptimo del sistema es de 100m * 50m, para conseguir potencias de 1 a 2.5MW.

El oleaje produciría una rotación en las articulaciones que se podría aprovechar para accionar bombas hidráulicas. Su eficiencia teórica puede alcanzar el 90%. En ensayos con prototipos se han encontrado eficiencias del orden del 40% al 50%. Dadas sus

gigantescas dimensiones, y las inmensas fuerzas que actúan sobre el anclaje, hacen que el sistema Raft no resulte competitivo.

OWC Rompeolas Sumergido.- Se han propuesto rompeolas sumergidos, figura 2.19, para calmar el mar, (que evitan impactos por el oleaje y no dificultan el tráfico marino), a base de placas horizontales ancladas en el fondo, que han demostrado su efectividad para absorber parcialmente el oleaje; en ensayos de laboratorio se ha encontrado que hasta el 35% de la energía incidente del oleaje circula por debajo de la placa, en sentido opuesto al oleaje, flujo que se podría aprovechar en una turbina hidráulica.

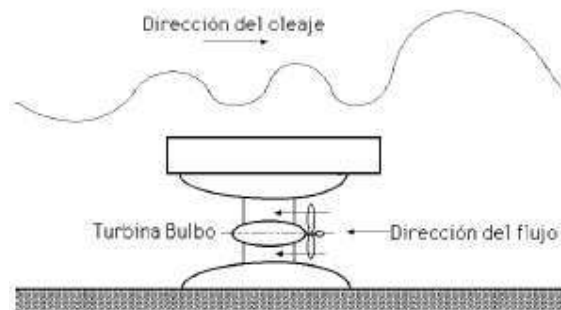


Figura 2.19 Rompeolas sumergido con turbina Bulbo

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

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

Existen varios prototipos de OWCs neumáticos, algunos de ellos a escala real, siendo el único OWC que se ha comercializado con éxito para suministrar electricidad a los sistemas de iluminación de boyas de navegación. Su popularidad se debe a su aparente simplicidad por cuanto convierte las velocidades bajas y fuerzas altas del oleaje, en un flujo de aire de alta velocidad y baja fuerza, aptos para la alimentación de un generador eléctrico. Figura 2.20 describe el dispositivo anterior.

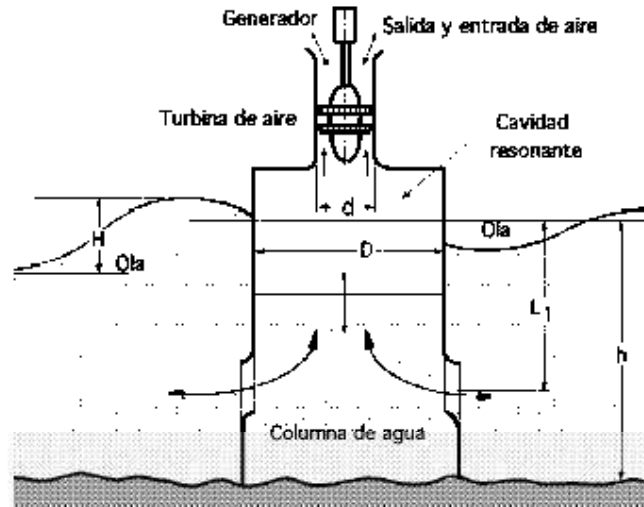


Figura 2.20 Esquema de funcionamiento de un OWC neumático anclado al fondo.

OWC Shoreline o Convertidor Belfast.- Este OWC, proyectado para ser ubicado en la costa, aprovecha las formas naturales del litoral; su desarrollo fue iniciado en la Queen's University de Belfast en 1985, Figura 2.21. En el diseño se intenta concentrar el oleaje hacia la cámara; estructuralmente se basa en la simplicidad de los componentes, minimizando los costes de la obra civil, incorporando los acantilados como parte de la cámara de aire.

El aire de la cámara se conduce a través de un tubo de 1m de diámetro hacia una turbina biplana tipo Wells, (que gira siempre en el mismo sentido independientemente de la corriente de aire), de potencia nominal 75kW y velocidad nominal 1500rpm.

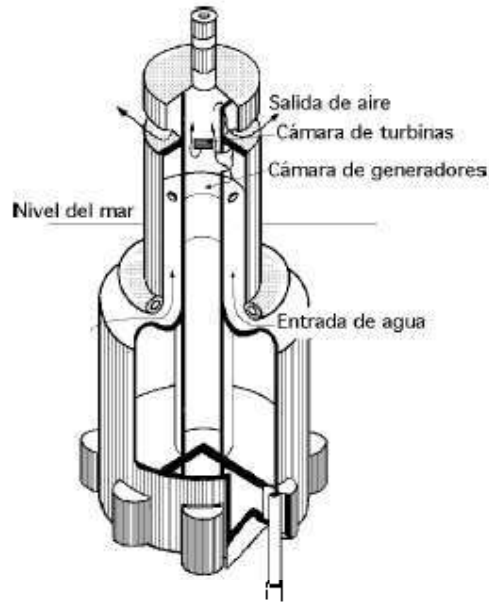


Figura 2.21 Convertidor Belfast

OWC de Madras (India).-Este OWC se construyó en la costa de Kerala, cerca de Trivandrum, India, y genera 150kW desde 1991, Figura 2.22. La cámara es un cajón de hormigón de 3.000Tm, fabricado en dique seco, y posteriormente anclado en la parte exterior de un rompeolas; las cámaras se llenaron con 3.000Tm de arena; la estructura, de 6.000 Tm, soporta el impacto de olas de hasta 7m; la turbina es de tipo Wells de eje vertical, con un rotor de 2 metros de diámetro.

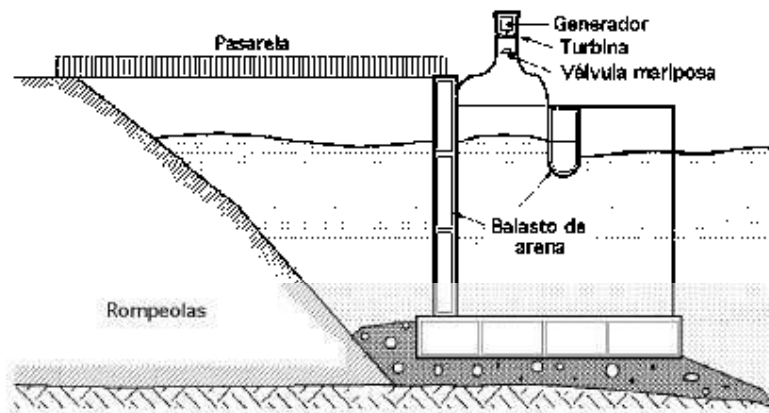


Figura 2.22.- OWC de Madrás

OWC Sanze o boya Masuda (Japon).- Es una boya que tiene en su interior un sistema que actúa por el principio de cavidad resonante, accionando una turbina de aire comprimido por la columna de agua provocada por las olas, figura 2.23. Es similar al dispositivo de Islay, es el OWC de Sanze, Japón. La cámara es de hormigón, construido sobre roca en la costa; con un generador de 40kW.

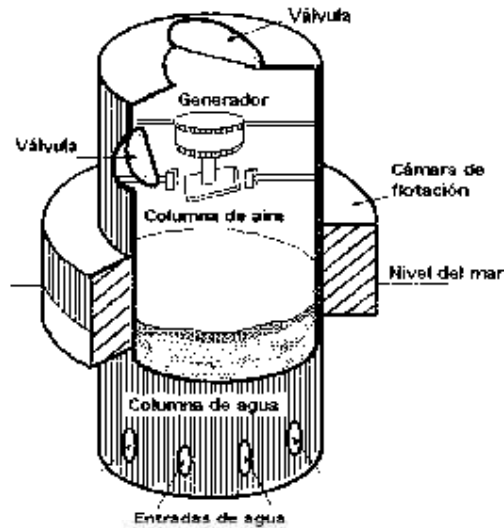


Figura 2.23Boya Masuda

2.8 Otra forma de aprovechar la energía del agua

Las centrales maremotrices funcionan, en principio, como molinos subacuáticos, sin embargo estas son movidas por la corriente marina en lugar de por el aire. Pueden ser construidas en el mar, en lugares con corrientes marinas de gran velocidad, o en algunos pocos lugares en los que la velocidad de la corriente marina permanente es suficiente.

Entonces a partir de esas enormes cantidades de flujos de agua se genera energía. Con dispositivos similares a los de la figura 2.24

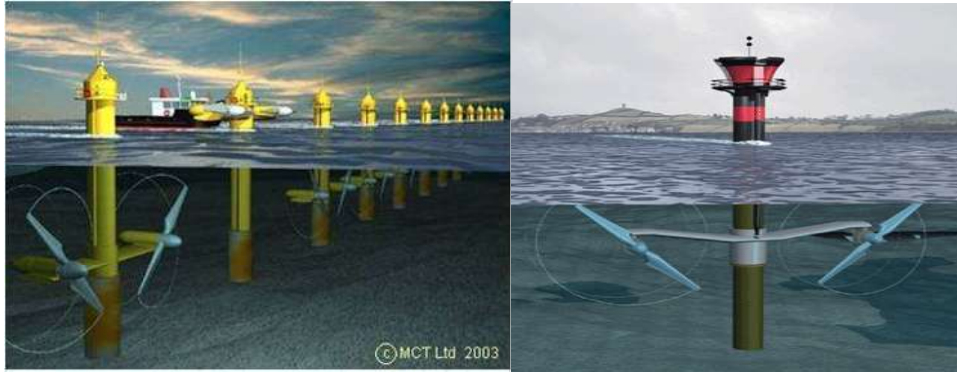


Figura 2.24 Granjas marítimas.

Las "granjas marítimas" utilizarán una nueva generación de boyas de 500kW de capacidad. Las boyas, ancladas al fondo marítimo y flotando en la superficie, capturan y convierten el movimiento de las olas en una fuerza mecánica que transmite su potencia a un generador, vinculado con la costa mediante un cable submarino.

Capítulo 3

Energía de olas y Desarrollo del Prototipo.

En este capítulo se aborda el diseño y construcción de un prototipo para el aprovechar el movimiento perpetuo de las olas para generar energía eléctrica, también se darán a conocer los resultados obtenidos del modelos físico del prototipo

3.1 Energía undimotriz

La energía undimotriz es la energía producida por el movimiento de las olas. Es menos conocida y extendida que la mareomotriz, pero cada vez se aplica más.

Algunos sistemas pueden ser:

Un aparato anclado al fondo y con una boya unida él con un cable. El movimiento de la boya se utiliza para mover un generador. Otra variante sería tener la maquinaria en tierra y las boyas metidas en un pozo comunicado con él mar.

Un aparato flotante de partes articuladas que obtiene energía del movimiento relativo entre sus partes. Como la "serpiente marina" Pelamis.

Un pozo con la parte superior hermética y la inferior comunicada con el mar. En la parte superior hay una pequeña abertura por la que sale el aire expulsado por las olas. Este aire mueve una turbina que es la que genera la electricidad.

La energía que desarrollan las olas es proporcional a las masas de aguas que oscilan y a la amplitud de oscilación. Esta energía se descompone en: una energía potencial, la cual provoca la deformación de la superficie del mar, y una energía cinética o de movimiento, debida al desplazamiento de las partículas; en suma, de la masa de agua.

Las olas del mar son ondas mecánicas (es decir, perturbaciones de un medio material) de las llamadas superficiales, que son aquellas que se propagan por la interfase (la frontera) entre dos medios materiales. En este caso se trata del límite entre la atmósfera y el océano. Cada molécula del agua, o cada objeto en suspensión en ella, sufre un movimiento circular que la devuelve cuando pasa la ola al mismo sitio donde se encontraba. Se trata de un vaivén con un componente vertical, de arriba a abajo, y otra longitudinal, en la dirección de propagación de la onda. Hay que distinguir entre dos movimientos distintos. El primero es la oscilación del medio movido por la onda que en este caso, como hemos visto, es un movimiento circular. El segundo es la propagación de la onda, que se produce porque la energía se transmite con ella, trasladando el fenómeno con una dirección y velocidad, llamada en este caso velocidad de onda.

En la figura 3.1 se ilustra el vaivén de dos partículas.

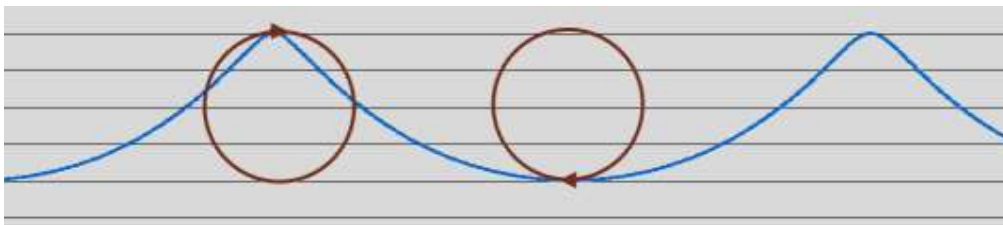


Figura 3.1 Dos partículas afectadas por el vaivén de un tren de olas

Las ondas se pueden observar en el mar, incluso en ausencia del viento; son masas de agua que avanzan y se propagan en la superficie en forma de ondulaciones cilíndricas.

Los elementos de una onda son: su longitud, esto es, la distancia entre dos crestas consecutivas; la amplitud o distancia vertical entre una cresta y un valle; el período, esto es el tiempo que se separa el paso de dos crestas consecutivas por delante en un punto fijo; y la velocidad. En la figura 3.2 puede observarse los elementos de una onda.

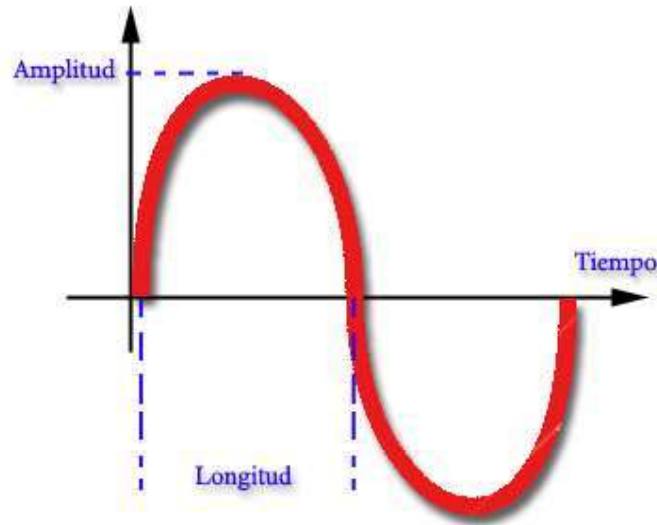


Figura 3.2 se describen los elementos de una onda

La energía que desarrollan las ondas es enorme y proporcional a las masas de aguas que oscilan y a la amplitud de oscilación. Esta energía se descompone en dos partes, las cuales, prácticamente, son iguales: una energía potencial, la cual provoca la deformación de la superficie del mar, y una energía cinética o de movimiento, debida al desplazamiento de las partículas; en suma, de la masa de agua.

3.1.1 Capacidad de Generación.

La energía estimada por las mareas es del orden de 22000 TWh(Terawatts-hora) . De esta energía se considera recuperable una cantidad que ronda los 200 TWh.

Tienen también una enorme energía Cinética (unas $30Tm/m^2$) debido a la gran masa de agua que se pone en movimiento. La densidad de energía disponible varía desde las más altas del mundo, entre 50-60kW/m en Nueva Zelanda, hasta el valor medio de 8kW/m.

Las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar. El calentamiento de la superficie terrestre genera viento y el viento genera las olas. Únicamente el 0.01% del flujo de la energía solar se transforma en energía de las olas. Una de las características de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias sin apenas pérdida de energía. Por ello, la energía generada en cualquier parte del océano acaba en el borde continental. De este modo la energía de las olas se concentra en las costas, que totalizan

336,000Km. De longitud. La densidad de energía de las olas es, en un orden de magnitud mayor que la de la energía solar.

El fenómeno es provocado por el viento, cuya fricción con la superficie del agua produce un cierto arrastre, dando lugar primero a la formación de rizaduras (arrugas) en la superficie del agua, llamadas ondas u olas capilares, de sólo unos milímetros de altura y hasta 1.7cm de longitud de onda. Cuando la superficie pierde su lisura, el efecto de fricción se intensifica y las pequeñas rizaduras iniciales dejan paso a olas de gravedad.

Las fuerzas que tienden a restaurar la forma lisa de la superficie del agua, y que con ello provocan el avance de la deformación, son la tensión superficial y la gravedad. Las ondas capilares se mantienen esencialmente sólo por la tensión superficial, mientras que la gravedad es la fuerza que tensa y mueve las olas más grandes.

Cuanto mayor es la altura de las olas, mayor es la cantidad de energía que pueden extraer del viento, de forma que se produce una realimentación positiva. La altura de las olas viene a depender de tres parámetros del viento, que son su velocidad, su persistencia en el tiempo y, por último, la estabilidad de su dirección. Así los mayores oleajes se producen en circunstancias meteorológicas en que se cumplen ampliamente estas condiciones.

Una vez puestas en marcha, las olas que se desplazan sobre aguas profundas disipan su energía muy lentamente, de forma que alcanzan regiones muy separadas de su lugar de formación. Así pueden observarse oleajes de gran altura en ausencia de viento.

Las olas disipan su energía de varias maneras. Una parte puede convertirse en una corriente superficial, un desplazamiento en masa de un gran volumen de agua hasta una profundidad considerable. Otra parte se disipa por fricción con el aire, en una inversión del fenómeno que puso en marcha las olas. Parte de la energía puede disiparse si una velocidad excesiva del viento provoca la ruptura de las crestas. Por último, la energía termina por disiparse por interacción con la corteza sólida, cuando el fondo es poco profundo o cuando finalmente las olas se estrellan con la costa.

Al llegar a la costa, las olas sufren unas últimas transformaciones antes de disiparse, dependiendo del obstáculo, su forma y tamaño, y la fuerza y velocidad de la ola, así como el punto de marea, las olas costeras pueden adquirir diferentes expresiones de tamaño, velocidad, forma o movimiento.

3.2 Tipo de Olas

Olas libres u oscilatorias: Se representan en toda la superficie del mar y se deben a las variaciones del nivel del mar. En ellas el agua no avanza, sólo describe un giro al subir y bajar casi en el mismo sitio en el cual se originó el ascenso de la ola, se presentan en un tiempo menor de 30 segundos.

Olas forzadas: Se producen por el viento y en ocasiones pueden ser altas como consecuencia de los huracanes.

Olas de traslación: Se presentan en la playa, la ola al tocar fondo avanza y se estrella en el litoral formando espuma, al regresar el agua al mar se origina resaca.

Tsunamis: Son olas producidas por un maremoto, o por una explosión volcánica. Pueden pasar dos situaciones, una es que en el centro de la perturbación se hundan las aguas, o bien que éstas se levanten explosivamente.

3.3 Los dispositivos que se han construido para el aprovechamiento del olaje

- Convertidor Noruego Kvaerner
- El Pato de Salter
- Balsa de Cockerell
- Rectificador de Russell
- Boya de Nasuda

La tabla 3.1 muestra los valores de energía procedentes de este tipo de fuente de acuerdo a la ubicación en el mar y su cercanía a las costas.

Tabla 3.1 En kW/m según la profundidad donde se coloque el dispositivo

Zona	Valores en kw/m
Aguas profundas	70
Zonas cercanas a orilla	20-30
Orilla	10

La posibilidad de obtener energía de las olas se ha estudiado desde la época de la revolución Francesa, cuando las primeras patentes fueron registradas en París en 1799 por un padre e hijo de apellido Girard. Poco progreso tuvo lugar en convertir este movimiento en energía útil hasta el último cuarto del siglo pasado, principalmente por falta de conocimiento científico de lo que era una ola, cómo avanzaba y cómo podría ser transformada. Por otra parte, también existía un merecido respeto por la naturaleza formidable de la tarea, y el considerable capital necesario tampoco estaba disponible.

Fue hasta principios de los años 70 del pasado siglo cuando surgieron proyectos financiados por empresas y gobiernos como los de Japón y Reino Unido

En síntesis, se trata de captar el movimiento alternativo que producen las olas y convertirlo en otro tipo de movimiento que aporte energía útil.

Yoshio Masuda, del Japón, inventó La Columna de Agua Oscilante – Oscillating Water Column (OWC) –, una chimenea instalada en el lecho del mar que admite las olas a través de una apertura cerca de su base. Al subir y caer las olas en el mar abierto, la altura de la columna de agua que contiene también sube y baja. Cuando el nivel del agua sube, el aire es forzado hacia arriba y fuera a través de una turbina que gira e impulsa el generador. Al volver a caer, el aire es succionado de vuelta de la atmósfera para llenar el vacío resultante, y el turbogenerador es activado nuevamente.

El Profesor Alan Wells, de la Queen’s University de Belfast, Irlanda del Norte, ha mejorado considerablemente la eficiencia del invento, diseñando una turbina que gira en

la misma dirección, sin tener en cuenta si el aire es empujado hacia fuera o succionado de vuelta a la chimenea. La figura 3.3 describe la columna de agua oscilante.

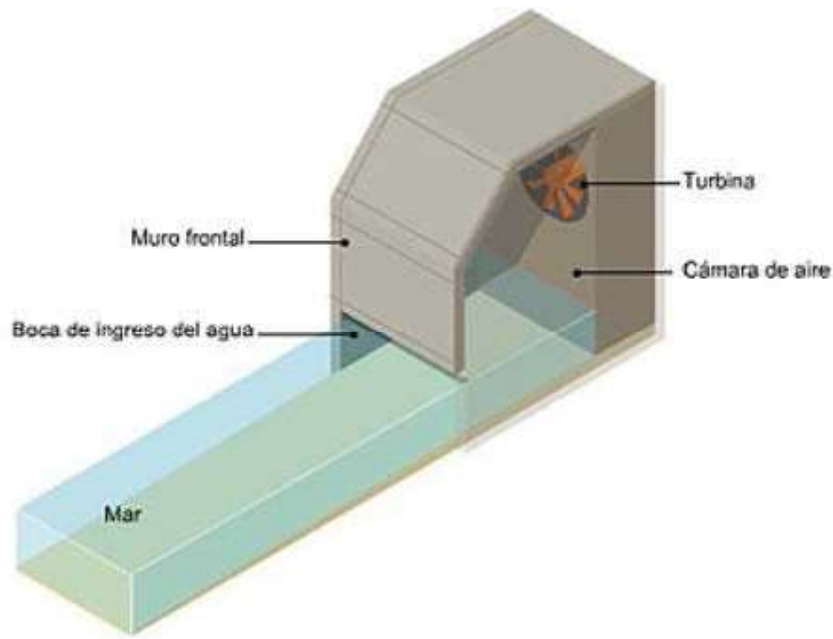


Figura 3.3 Columna de agua oscilante

El sistema Pelamis de obtención de energía está diseñado más desde el punto de vista de resistencia a las condiciones marinas que para obtener la más eficiente conversión de energía posible. Por tanto, en vez de intentar absorber toda la energía disponible en cada ola, convierte sólo una porción. El objetivo es que el sistema pueda sobrevivir casi sin mantenimiento en condiciones meteorológicas marinas muy adversas (tormentas, ciclones) que podrían dañar un sistema optimizado solamente para la eficiencia de conversión.

El sistema Pelamis consiste en una serie de secciones cilíndricas parcialmente sumergidas, unidas por juntas bisagra. La ola induce un movimiento relativo entre dichas secciones, activando un sistema hidráulico interior que bombea aceite a alta presión a través de un sistema de motores hidráulicos, equilibrándose con el contenido unos acumuladores.

Los motores hidráulicos están acoplados a un generador eléctrico para producir electricidad. Se estima que la cantidad de energía obtenida por 40 de estos sistemas, podría abastecer aproximadamente 20,000 hogares con un consumo medio europeo.

La potencia de todos los sistemas hidráulicos de un elemento se transportan mediante un solo cable a una base situada en el lecho oceánico. Varios elementos se pueden interconectar a una misma base para unir su potencia de generación y tránsala dar la energía producida mediante un solo cable submarino hacia la costa: figura 3.4 derribe un pelamis.

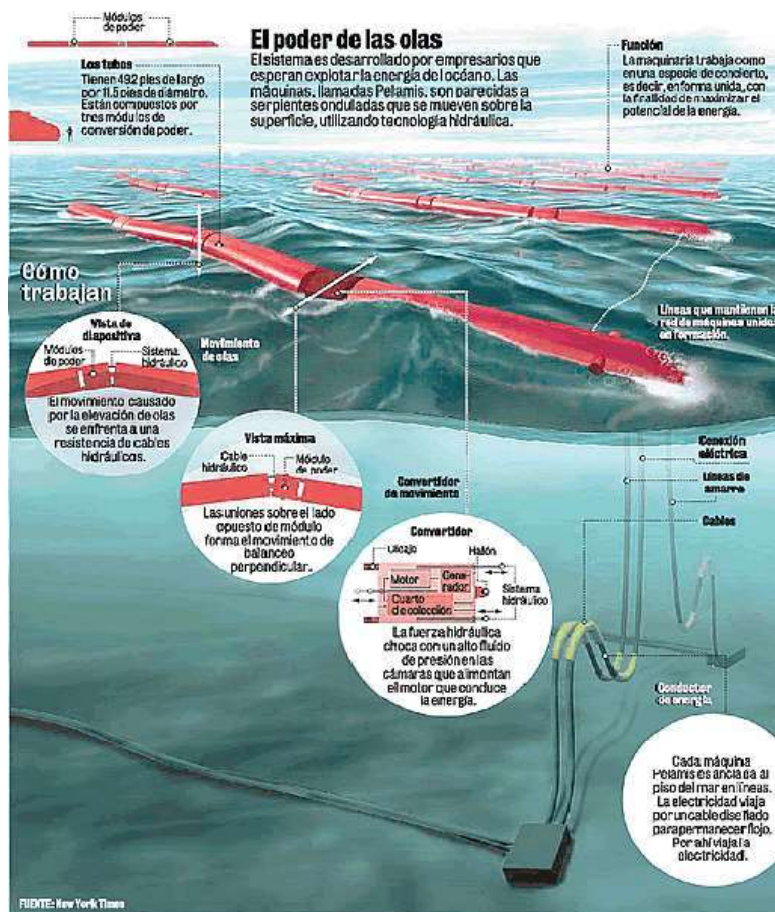


Figura 3.4 Describe el sistema pelamis

En la figura 3.5 se muestra el diagrama de un pelamis.

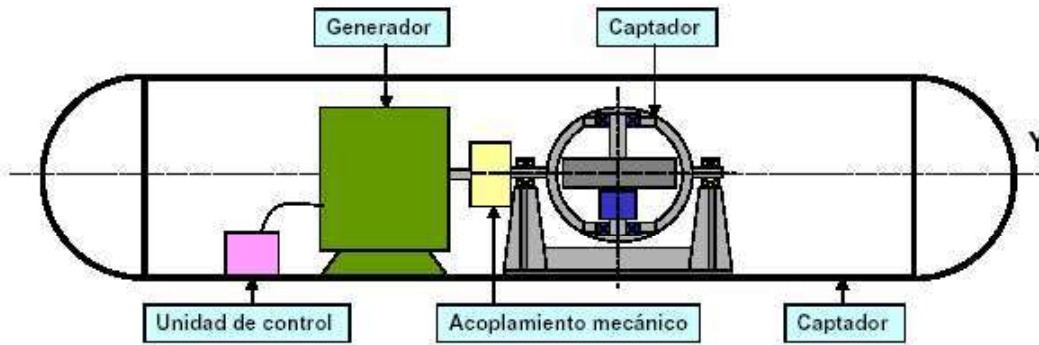


Figura 3.5 Elementos que conforman un pelamis

El WaveRoller es un dispositivo anclado al fondo marino, cuyas placas móviles oscilan con el movimiento de las olas. La energía cinética creada por esta oscilación se almacena en una bomba a pistón, y luego puede ser convertida a electricidad usando un sistema hidráulico cerrado en combinación con un generador.

Los WaveRollers están diseñados para alta eficiencia. Una sola unidad de producción logrará alrededor de 13kW de energía eléctrica en condiciones de buen oleaje.

Figura 3.6 el mecanismo de WaveRoller es una placa que absorbe el choque de ola para mover un brazo hidráulico y de esta manera impulsar un presión que a su vez mueve una turbina sujeta la flecha de un generador.

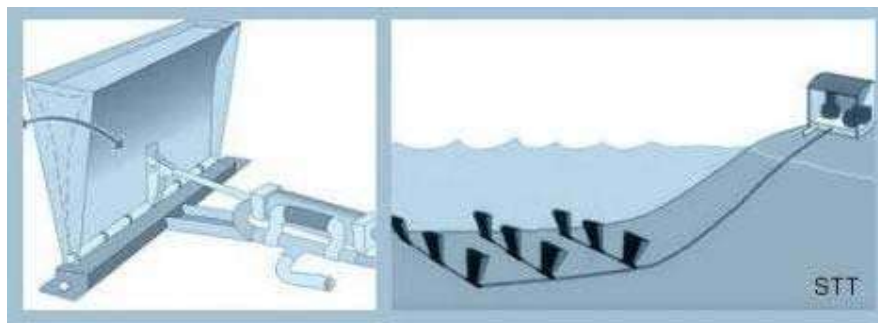


Figura 3.6 Esquema que describe describe la tecnología WaverRoller.

3.4 Generación de electricidad utilizando boyas marinas

El agua entra y sale de la bomba con el movimiento e impulsa un generador que produce la electricidad. La corriente se transmite a tierra a través de un cable submarino. En la figura 3.7 se observa un la constitución de boya nasuda.

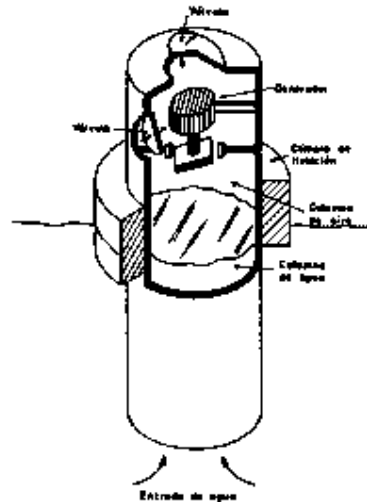


Figura 3.7 Construcción de una boya nasuda

En la figura 3.8 se muestran las partes que forman una boya marina, así como una imagen de una boya de prueba en el océano

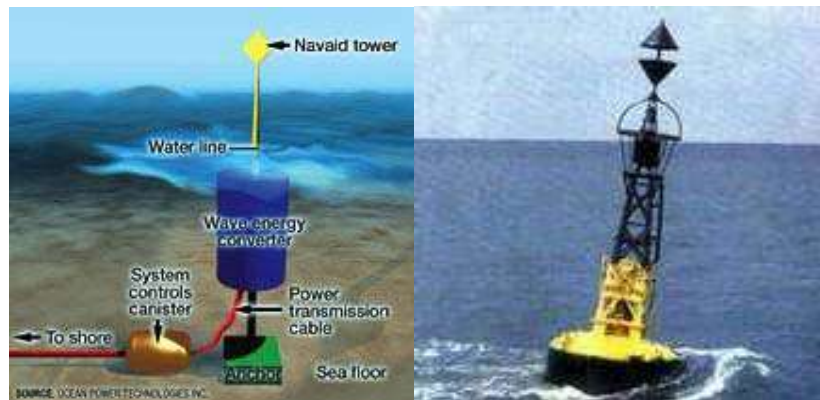


Figura 3.8a) Partes que conforman una boya marina. Figura 3.8b) En la imagen se puede observar una boya de prueba en el océano.

3.5 Consideraciones para la construcción del prototipo

La mayoría de los prototipos desarrollados en el pasado están compuestos por los elementos que muestra el diagrama de bloques de la figura 3.9.

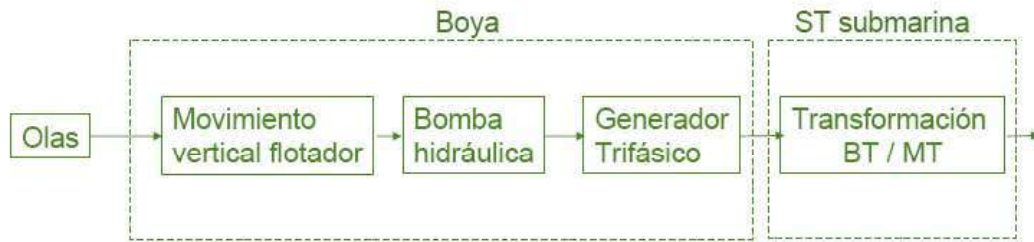


Figura 3.9 Diagrama de bloques de un boya generadora de electricidad

La ley de Faraday establece que la corriente inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético que lo atraviesa [2].

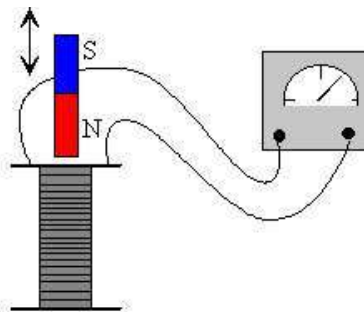


Figura 3.10 Con una bobina, un amperímetro y un imán

En la figura 3.10 se tiene las siguientes experiencias:

1. Se sitúa el imán en reposo dentro del solenoide.
2. Se introduce despacio/deprisa el imán en el solenoide.
3. Se saca despacio/deprisa el imán del solenoide.
4. Se observa el movimiento de la aguja del amperímetro
5. Se aplica la ley de Lenz, para determinar el sentido de la corriente inducida

Ley de Lenz establece que las fuerzas electromotrices o las corrientes inducidas serán de un sentido tal que se opongan a la variación del flujo magnético que las produjo. Esta ley es una consecuencia del principio de conservación de la energía.

Principio de Arquímedes: todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso de fluido desalojado. Figura 3.11 principio de Arquímedes

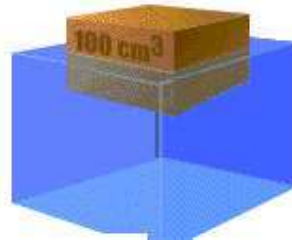


Figura 3.11 Madera experimenta un empuje hacia arriba igual al volumen de agua desalojado

Movimiento esquivo

Una ola se desplaza hacia adelante en un movimiento esquivo, arriba y abajo. Su altura máxima es la indicación clave de su fuerza. De manera que, cuanto más agitado el mar, más potencialmente fructífero será, pero también más difícil resulta cosechar su energía.

Por ende, los ingenieros de energía de las olas deben diseñar una central eléctrica capaz de absorber la fuerza de las olas más feroces sin peligro de naufragar. Dos de ellas, en Escocia y Noruega, ya han caído víctimas del mar.

3.6 Parámetros de la ola

La parte más alta de una ola es su cresta, y la parte más profunda de la depresión entre dos olas consecutivas se llama valle. A la distancia entre dos crestas se le denomina longitud de onda (λ) y a la diferencia de altura entre una cresta y un valle se le llama altura de la ola. La amplitud es la distancia que la partícula se aparta de su posición media en una dirección perpendicular a la de la propagación. La amplitud vale la mitad de la altura. La pendiente (δ) es el cociente de la altura y la longitud de onda:

$$\delta = \frac{H}{\lambda} \quad (3.1)$$

Donde:

δ = la pendiente

H = altura máxima de onda

λ = longitud de onda

Se llama período (τ) al tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas consecutivas por el mismo punto. La velocidad de onda (también llamada velocidad de fase o celeridad), es decir la velocidad de propagación, se calcula dividiendo la longitud de onda por el período:

$$c = \frac{\lambda}{\tau} \quad (3.2)$$

La figura 3.12 especifica los parámetros de una ola.

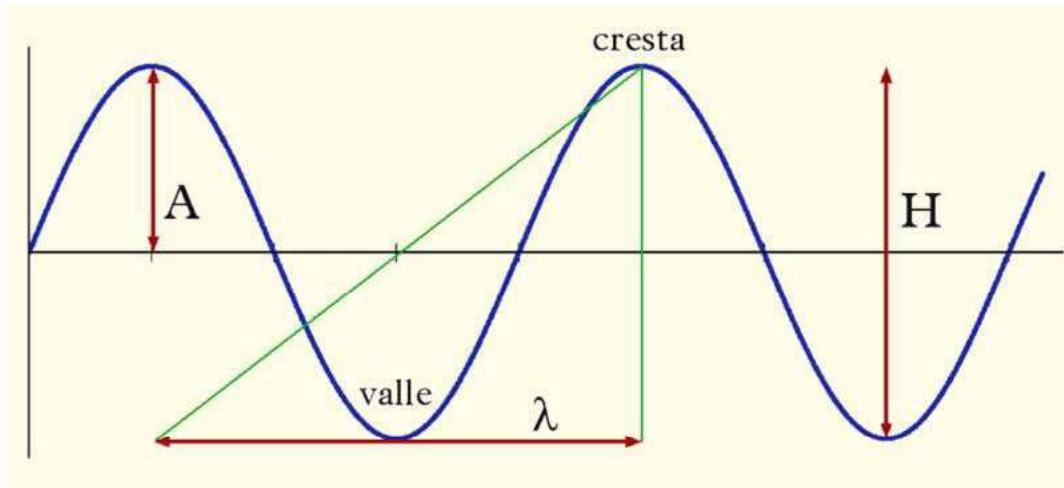


Figura 3.12 Parámetros de una ola

Esta figura 3.13 muestra la energía de la ola (la cual como veremos, es proporcional a su altura al cuadrado) en función de la frecuencia (o período: que es el inverso de la frecuencia). En la primera fila se indica la fuerza generadora principal de este disturbio, y en la segunda fila (derecha) se indica la fuerza restauradora principal que disipa o modifica el movimiento ondulatorio.

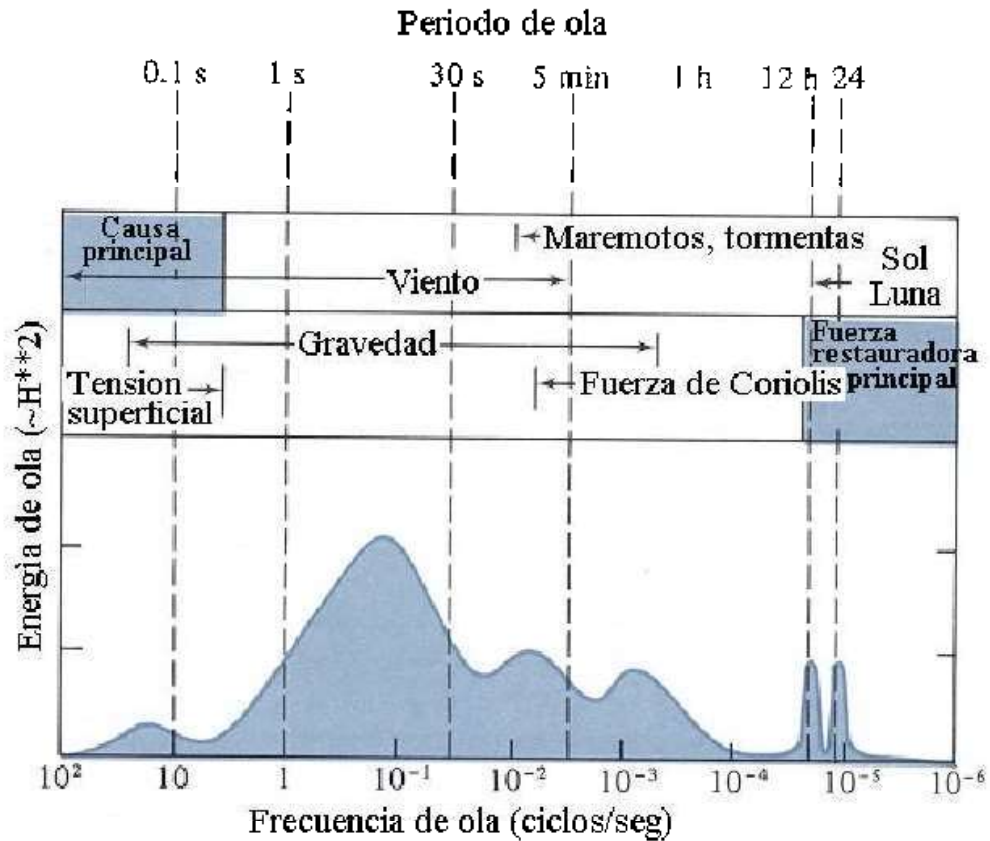


Figura 3.13 Energía, periodo y frecuencia de ola

El pico de máxima energía está entre los 4 y 12 segundos, que corresponden a las olas generadas por el viento. Esto quiere decir que la mayoría de las olas en el océano tienen energía alrededor de esos periodos, son las olas más frecuentes formadas en el océano. Nótese los picos de ondas de marea de 12 y 24 horas generadas por la Luna y el Sol.

3.7 Velocidad de olas

Aunque el tratamiento de las olas en una determinada zona costera es complicado y supone el empleo de la estadística es posible una cierta formalización matemática sencilla del fenómeno del oleaje.

Las olas pueden ser tratadas como una onda como todas las ondas, se caracterizan por una serie de parámetros: longitud de onda, amplitud y velocidad de la ola.

Existen ciertas expresiones matemáticas que nos permiten hacer una estimación de la velocidad de una ola si conocemos su amplitud y su longitud de onda.

Los datos de partida son obtenidos, generalmente, en aguas profundas y es necesaria su transformación hasta la zona de interés considerando procesos tales como: asomeramiento, refracción, difracción, disipación hacia la costa. Se puede demostrar que en lo referente a la velocidad de la ola hay dos casos.

- a) En el océano la altura (H) de la ola es generalmente mucho menor que su longitud (L). En virtud de esto, la teoría que describe el movimiento de una ola se hace más sencilla (teoría lineal de onda o de pequeña amplitud), donde la velocidad de fase o velocidad de propagación de la onda es dada por:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k \tanh(kh)}} \quad (3.3)$$

Donde:

$k = \frac{2\pi}{L}$, es el número de onda

h: profundidad del agua

L: la longitud de onda

g: la aceleración gravitacional

tanh: tangente hiperbólica

- b) El segundo caso se presenta en donde la profundidad es mucho menor, la velocidad de fase o velocidad de propagación de la onda es dada por:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (3.4)$$

Donde:

σ = velocidad de fase

$k = \frac{2\pi}{L}$, es el número de onda

h: profundidad del agua

L: la longitud de onda

g: la aceleración gravitacional

tanh: tangente hiperbólica

Indica que la longitud de onda es siempre más corta en profundidades reducidas que en indefinidas, la energía potencial que es desplazamiento de las partículas de su posición de equilibrio. Resulta de esa parte de masa de fluido de la cresta sobre el valle de la onda.

Energía cinética que es movimiento de las partículas. Resulta de las velocidades de las partículas asociada con el movimiento de la onda.

De esta manera, la energía total en una onda es dada por:

$$E = \frac{1}{8} \alpha H^2 \text{ joules/m}^2 \quad (3.5)$$

Donde:

α es la densidad del agua de mar.

g = la aceleración gravitacional. Nótese que la energía es proporcional a la altura de la onda al cuadrado.

Como las ondas viajan con diferente velocidad lo que nosotros vemos en el océano, en un instante dado es realmente la envolvente de esas ondas figura 3.14, que en un momento dado se superponen y forman esa ola que vemos, pero que si la seguimos por un tiempo, se desaparece.

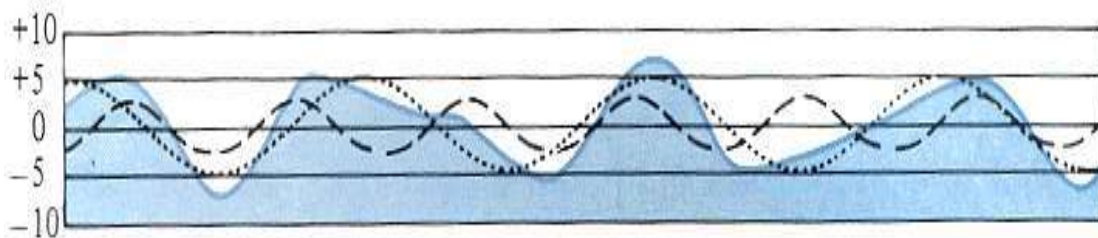


Figura 3.14 Diferentes velocidades que se presentan en una ola

- — — — — Olas de 5 m y 60 m de largo viniendo desde el noroeste
- Olas de 10 m de alto y 100 m de largo viniendo desde el oeste-suroeste
- Superficie del océano como resultado de la interferencia del sistema de ondas

Los modelos de propagación existentes se basan en:

- a) Teorías matemáticas de ondas
 - b) Modelos basados en la ecuación de la "mildslope" (pendiente suave).
 - c) Solución de la ecuación en forma elíptica.
 - d) Solución de la ecuación en forma parabólica.
 - e) Solución de la ecuación como un sistema de ecuaciones hiperbólicas.
 - f) Modelos basados en las ecuaciones de conservación
 - g) Conservación de la acción de onda
- Irrotacionalidad del número de onda

3.8 Desarrollo del prototipo a escala

El prototipo a escala pretende representar, en forma simplificada la manera de convertir la energía del mar en electromotriz. Por ello se construirá físicamente el modelo.

Se generaron olas que perturban el agua haciendo oscilar una boya que flota en la superficie del agua. La boya se encuentra fija a un eje, el cual tiene un imán en su parte superior que pasa por una bobina generando energía eléctrica.

El modelo propuesto se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.15 donde cambiamos el sistema de bombeo por un campo magnético en este caso nuestro imán y generador por un inductor (bobina)

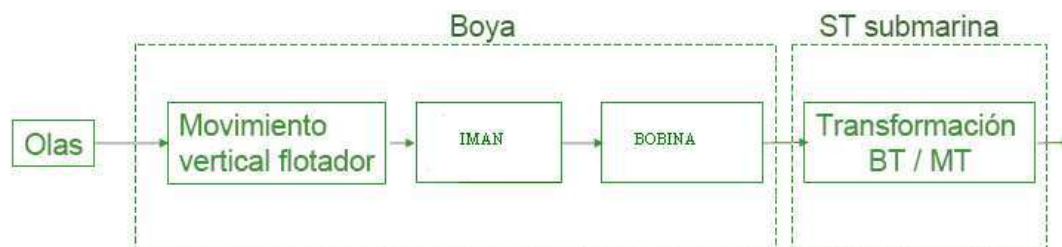


Figura 3.15 Diagrama de bloque de prototipo propuesto

En la tabla 3.2 se menciona el material necesario para la construcción del prototipo.

Tabla 3.2 Material del prototipo

MATERIAL	CANTIDAD
Bobina	1
Imán	1
Madera	1 (80*30 cm) 2 (30*30 cm)
Paleta	1 (25*30 cm)
Bisagras	2 tipo piano
Silicón	1
Cristal	1 (80*30cm)
Malla	1 (30*30cm)
Pijas	24(2 pulgadas)

a) Generador de olas:

Consiste en una paleta que va desde el fondo a la superficie y tiene un par bisagras en el fondo para regular su movimiento, la paleta es impulsada por un brazo que esta sujeta a la polea de un motor de 9 watts de potencia.

b) Malla con grava-arena

Se ubican a un extremo del estanque, para absorber las ondas y evitar su reflexión. Esta malla representa la orilla de la playa.

La razón de esto es evitar la distorsión de las olas debido a la reflexión en los bordes. A su vez, se coloca grava-arena (una especie de playa) en el borde anterior del acuario, de modo de absorber la energía de las olas incidentes (nuevamente se evita reflexión) Figura 3.16 ilustra el prototipo que se diseño para llevar acabo la contracción.

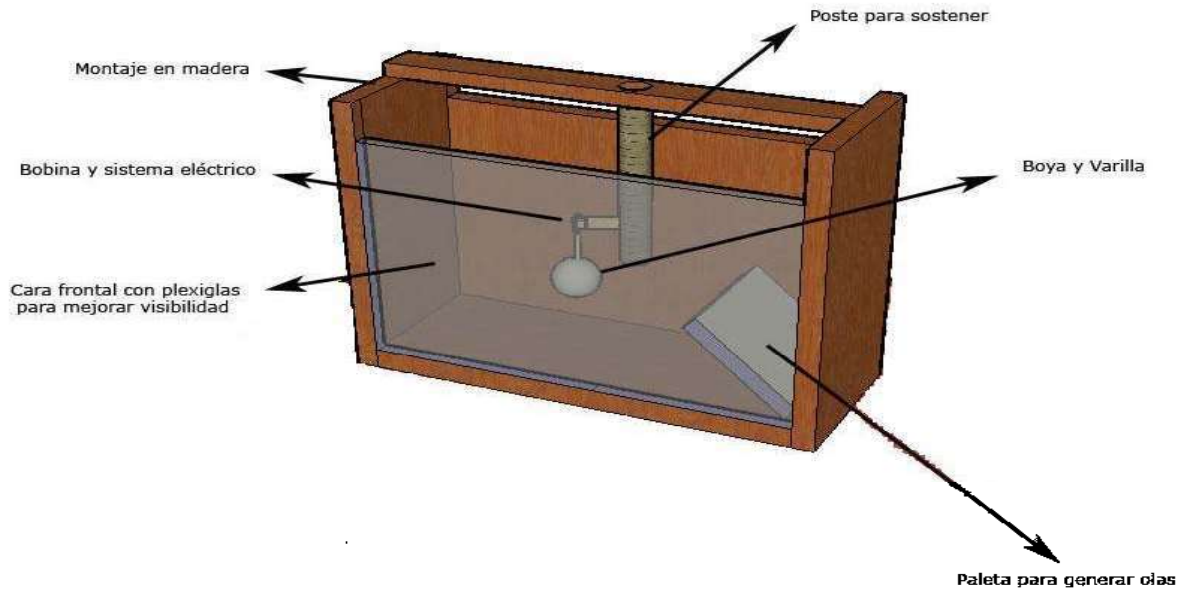


Figura 3.16 Modelo físico construido

El siguiente dispositivo tiene por objetivo la obtención eficiente de energía mareomotriz a través de las olas.

Sistema electro-magneto-mecánico. Éste consiste en un resorte, una varilla, una boya y un imán rodeado por una bobina (solenoides). El objetivo de este sistema es la generación eléctrica. Para ello, al incidir una ola sobre la boya, debido a la fuerza de flotación, esta tenderá a subir, esta elevación esta dada por la ley de Arquímedes, lo cual comprimirá el resorte (el cual sirve como elemento restaurador) y hará que el imán acelere dentro de la bobina, produciendo un cambio en el flujo magnético dentro del solenoide, induciendo una fem. a través de este. Luego que pase la perturbación, el resorte restaurará la posición de la bolla, induciendo nuevamente una fem. Pero en sentido contrario. El descenso de la boya se debe la ley de gravedad. En la figura 3.17 se muestra como está formado el sistema electro-magneto-mecánico.

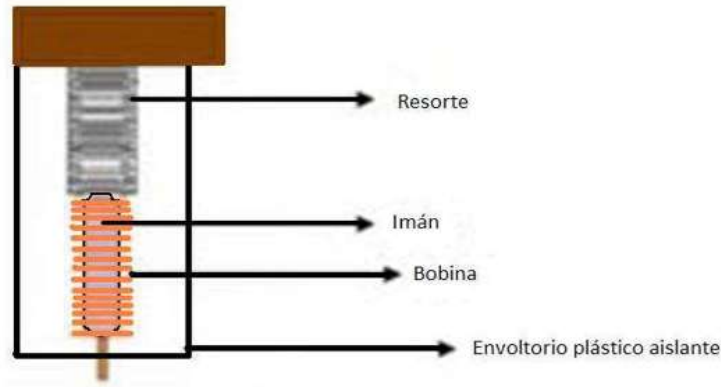


Figura 3.17 Sistema electro-magneto-mecánico

Es obvio decir que la fuerza hacia arriba que ejerce cada flotador se deriva de la simple aplicación del principio de Arquímedes y la fuerza hacia abajo surge de la ley de la gravitación como se ve en la figura 3 .18

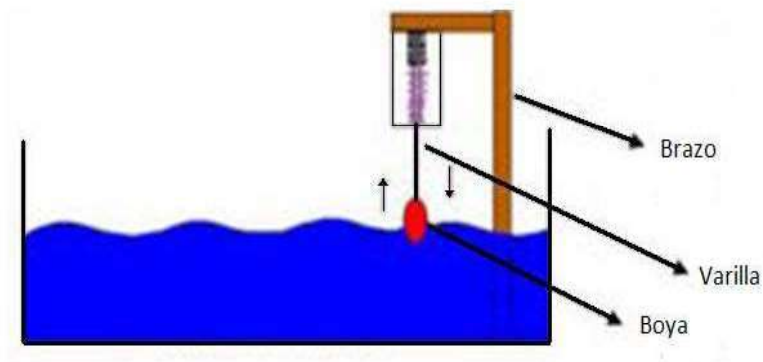


Figura 3.18 Sistema electro-magneto-mecánico montado en el estaque.

Esta central no necesita más que el suave movimiento ascendente y descendente del mar.

Por ultimo la s fotografías muestra el prototipo real donde se observa el estanque y el mecanismo motor _ paleta el cual se encarga de producir las olas artificialmente esto se muestra en la figuras 3.19, 3.20 y 3.21



En la figura 3.19 Prototipo usado para obtener los resultados puestos el capítulo 4

El sistema motor_ paleta de la figura 3.20 permite generar olas artificialmente, de forma aleatoria la velocidad de olas o y su altitud depende del voltaje que se aplique al las terminales del motor, pero no se debe abusar en la aplicación de voltaje ya que con demasiado voltaje se produce un oleaje demasiado inestable capaz de dañar nuestro dispositivo generador de electricidad.



Figura 3.20 Sistema motor _ paleta

La figura 3.21 describe el sistema electro -magnético- mecánico. En la punta de la boya se pueden observar el imán de neólito, el imán sujeto a la barrilla pasara a través de el diámetro de la bobina blanca induciendo un voltaje debido al movimiento de la ola la; boya se encuentra sobre dos magnetos de diámetro mayor, lo cuales se colocan a un costados de cualquiera de la bobinas y se genera un campo magnético similar al que produce colocando el imán en la punta de la boya, por lo que si utilizamos los magnetos de mayor diámetro el campo magnético es tan grande que no es necesario colocar el imán pequeño en la punta para inducir voltaje en el imán; y la imagen también muestra 2 bobinas la de color blanco es la construida para nuestro prototipo de 3000 vueltas.



Figura 3.21 Boya_magneto_inductor; par de bobinas un imán de diámetro de un cm, 2 imanes de diámetro 4cm.

En corriente continua el condensador se cargará progresivamente hasta que alcance su valor máximo. Una vez alcanzado el valor máximo, la corriente en la salida del condensador es lo suficiente para lograr encender un led.

Esta es una forma de controlar el voltaje de salida del solenoide además con el condensador también se logra aumentar el voltaje y la corriente.

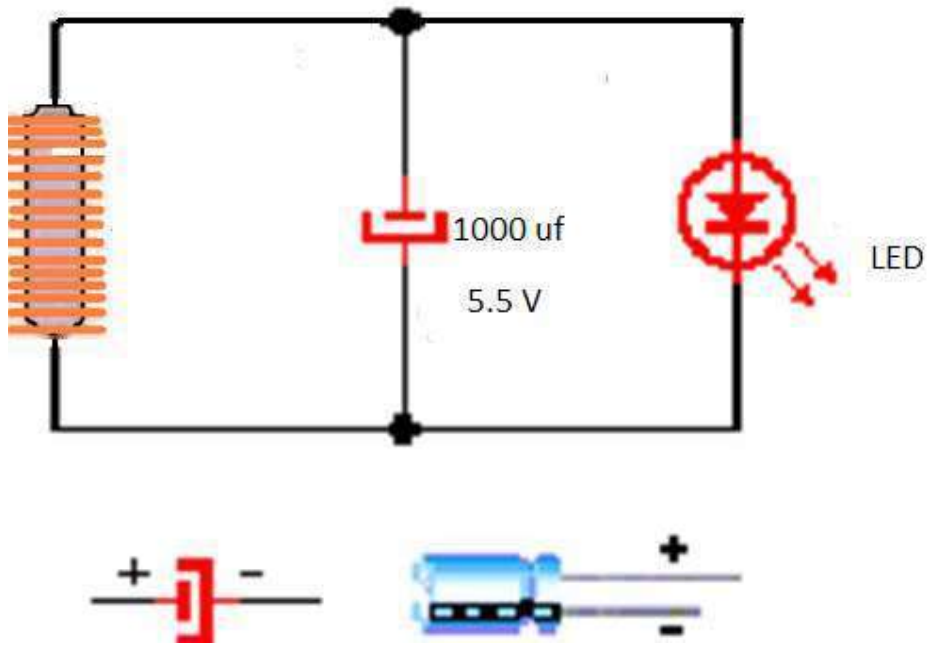


Figura 3.22 Diagrama de control de voltaje.

El condensador como se encuentra en paralelo a la bobina siempre tendrá el voltaje que proporcione el la bobina cuando el voltaje en esta sea el máximo el condensador retiene este valor y por lo tanto aunque el voltaje de la fuente disminuya el condensador proporcionara al led el voltaje máximo almacenado. Nuevamente el condensador se volverá a cargar de voltaje proporcionado por la fuente.

Capítulo 4

Factibilidad de la energía undimotriz y pruebas del prototipo

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas a nuestro prototipo y también se proponen algunas consideraciones a futuro si se desea obtener mejores resultados.

A diferencia de la energía maremotriz, que es la que aprovecha la energía cinética de las corrientes marinas que se relacionan a los desniveles producidos por las mareas, la undimotriz pretende captar toda la energía de las olas por medio de sistemas variados como la flotación o el efecto balanceo.

4.1 Antecedentes históricos recientes

En el verano de 2003, el WDS (Wave Dragon Systems A/S) se transformó en el primer dispositivo de ola off-shore conectado a una red en el mundo cuando se instaló en Nissum Bredning, Dinamarca. El WDS tiene un rendimiento de 20Kw. El dispositivo está concebido sólo como una plataforma de prueba y su capacidad no es comparable a una WDS comercial. Luego de las pruebas iniciales, se agregaron turbinas adicionales y el dispositivo movió a una nueva locación con mayor intensidad de oleaje. El dispositivo se probó aquí durante dos años para permitir a los diseñadores ganar conocimiento y experimentar lo máximo posible antes de embarcarse en la próxima fase de desarrollo de su tecnología.

Se proponen tres modelos diferentes para los distintos niveles de recurso de la ola que es prevaeciente fuera de las costas europeas. La capacidad más baja es de 4MW para una WDS diseñado para el Mar Norte. Los diseñadores creen que un WDS diseñado para el despliegue en el Atlántico tendría una capacidad de 7MW. Para las aguas fuera del Reino Unido, la compañía quiere desarrollar una máquina de 11MW que tendría un

depósito de 14,000m³ y pesaría 54,000 toneladas. La compañía planeo entrar de lleno en la fase de comercialización de sus productos durante 2006.

Wavegen – Limpet (2005)

Wavegen es uno de los líderes del mercado en la energía de la ola, después de haber instalado su dispositivo Limpet sobre la línea de la costa en la isla de Islay, fuera de la costa oriental de Escocia en 2000. Esta novedad tecnológica todavía esta operativa hoy.

En julio de 2005, Wavegen empezó el trabajo de actualización del dispositivo Limpet con sus turbinas recientemente desarrolladas, ofreciendo un rendimiento mayor y mejor eficiencia. Estas nuevas turbinas se usaran en los futuros rompeolas de Wavegen previstos algunos de estos proyectos a desarrollarse en aguas españolas. En esta capacidad las turbinas pueden instalarse en las barreras de protecciones costeras y en las paredes del puerto. Wavegen también está desarrollando el Nearshore, un sistema de OWC que genera energía de la ola actuando como un arrecife artificial. El dispositivo que descansa en el lecho marino puede actuar en algunos casos como protección costera, debido a que el agua detrás del dispositivo se despliega en relativamente la calma. La tecnología es de beneficio particular para las comunidades isleñas. El enfoque de Wavegen tiene el éxito debido a que su tecnología se basa en la búsqueda de soluciones a situaciones pre-existentes en la naturaleza.

4.2 Energía mareomotriz y de corrientes marinas.

El desarrollo de las tecnologías mareomotrices y de corriente marina de la marea en módulos de pequeña escala está progresando rápidamente. En el otoño del 2002 se desplegó y se probó con éxito un Stingray de 150kW de potencia, en Yell Sound, fuera de las Islas de Shetland. En el verano del 2003 la compañía Marine Current Turbines instaló sus primeras turbinas de corrientes marinas, con capacidad de 300kW, fuera de Lynmouth, Devon. Más recientemente, en septiembre del 2003 Hammerfest Strøm instaló la primera turbina mareomotriz conectada a una red, en el mundo. Cada una de estas tecnologías tiene el potencial comercial sustancial.

En la actualidad, los objetivos claves para el desarrollo de energía maremotriz se enfocan en el tema de las corrientes de marea y en la manera en que las existentes tecnologías puedan desarrollarse para arribar a su pleno potencial.

Se dan además de distintas formas de problemas similares a los existentes en la tecnología off-shore, como la conexión a la red y la financiación. En la actualidad, sin embargo, debido a que los dispositivos se construyen e instalan de uno en uno, muchos de los problemas son parte del proyecto específico. El factor más importante para el futuro inmediato está en ayudar a esta joven industria a no perder velocidad en su desarrollo hacia delante.

Muchos de los temas discutidos en la sección referente a la energía de la ola son aplicables a la energía maremotriz y de corriente marina, debido a que ambas industrias se encuentran en una similar etapa de progreso.

La tecnología de corriente marina se caracteriza por unidades más pequeñas que las unidades de gran escala y potencia de las barreras maremotrices. Las tecnologías y dispositivos en funcionamiento y así como las previstas para instalarse en el futuro próximo, se dividen en dos grupos: las turbinas actuales que actúan en base a las subientes y bajantes de la marea, y los generadores de la corriente de la marea.

Las primeras se visualizan como una turbina submarina que usa las corrientes de la marea para dar movimiento a un rotor y generar electricidad. Los generadores de la corriente de la marea usan la fuerza de la corriente para generar energía, por ejemplo, del sube y baja de un brazo hidráulico. Las corrientes de la marea son predecibles y fiables, por lo tanto proporciona una ventaja importante sobre la tecnología del viento.

Los sitios ideales están alrededor de 1km o mas de la orilla con profundices de agua de 20-30metros.

El primer prototipo de turbina se instaló en las afueras de Lynmouth en Devon en el año 2003 por la compañía británica Marine Current Turbines. Su rival, Hammerfest Strom instaló su dispositivo brevemente después. La ventaja de las turbinas actuales como éstas es que pueden desplegarse individualmente o como proyectos que consisten

en unidades múltiples. Como en la energía de las olas, hay un número muy grande de dispositivos que usan métodos diferentes para extraer la energía de las mareas. Aunque muchas de estas tecnologías usan ingeniería ya probada, no hay nada definitivo todavía.

Existen similitudes entre los dispositivos diferentes, particularmente en los diseños de la turbina maremotriz actual. Esto brinda un entorno de sana competencia y un impulso para la industria. Es importante decir que hay recursos disponibles suficientes para que todos puedan ser comercialmente viables.

4.3 Energía de las Olas 2004-2008

Se prevé que el Reino Unido será el jugador dominante en el sector de la energía de la ola, durante el próxima década, con una capacidad de previsión de 14.7MW.

El Reino Unido instaló nuevas turbinas durante todos estos años hasta 2008, mientras que los otros actores importantes son comparativamente más intermitentes.

Portugal, España y Dinamarca son otros mercados significativos pero no comparables con el Reino Unido que los deja atrás. El mercado norteamericano es intrigante porque se da un nivel alentador de interés en la tecnología de la ola. Sin embargo falta la participación gubernamental que está le faltando.

La capacidad de instalación del Reino Unido es el resultado de varias tecnologías avanzadas con muy buenas perspectivas, junto con un número creciente de dispositivos prototipo. El gobierno ha apoyado estos desarrollos con subsidios de distinta índole que junto con la disponibilidad de un recurso natural como es el Mar del Norte podría convertir a ese estado en el líder mundial indiscutible en energía de la ola para el 2008.

Las perspectivas posteriores a 2008 son aun más luminosas. El nivel a ser alcanzado en 2008 es debido al pequeño número de proyectos actualmente identificables. Con diseñadores cuyo objetivo actual no va más allá que el de demostrar la factibilidad de los dispositivos existentes actualmente en desarrollo, no es sorprendente. Sin embargo, a medida que estos proyectos progresen, los diseñadores negociarán y planearán

proyectos de mayor envergadura basados en tecnologías probadas por el uso instaladas durante el 2007 y 2008. Es durante este período que potenciales granjas de energía de olas podrían empezar a surgir. Cuando los dispositivos están en esta fase avanzada, la capacidad instalada empezará a aumentar significativamente. De hecho, las granjas de la ola de gran potencia recién podrán ser instaladas después del 2008.

El gasto total previsto para el desarrollo de la tecnología de la ola de 72.2 millones de euros hasta el 2008. Este bajo monto de inversión, no representa un derrumbamiento de la industria, sino por el contrario, la falta de mayor cantidad de proyectos en una etapa avanzada de implementación. El Reino Unido individualmente gastará 34.8 millones de euros en los próximos 15 años, donde 2006 y 2007 fueron los años de mayor desarrollo previsto del 86% del mercado.

Las tecnologías principales:

Ocean Power Delivery – Pelamis.- En la actualidad OPD se ve como el futuro líder del mercado, dispone de un producto que ya está en una fase avanzada de desarrollo, que puede instalarse fácilmente en las configuraciones de granja productora y con un costo económicamente eficaz. Las granjas con esta tecnología serán instaladas en 2008. Su asociación con Wind Prospect, el desarrollador ya establecido de granjas de ola, que da lugar a la formación de Ocean Prospect, la tecnología de Pelamis esta sumamente bien posicionada para el desarrollo de proyectos off shore del Reino Unido.

OPD se fundó en 1998 en Escocia para desarrollar el concepto de Pelamis. El Pelamis está compuesto de cinco segmentos cilíndricos conectados por las uniones en bisagra. El movimiento inducido por la ola en estas secciones produce resistencia en paletas hidráulicas que bombean el fluido a alta presión a través de los motores hidráulicos vía los acumuladores conectados a los generadores eléctricos. La energía se conecta a través de un cable unido en el lecho marino unido en puente un solo cable que lo transporta a la costa.

El Pelamis tiene una capacidad de 750 Kw, aunque los avances subsecuentes en la tecnología pueden permitir el desarrollo de un modelo de 1MW en un futuro próximo. El primer prototipo fue instalado en el Centro de Pruebas de Energía Marina en las

afueras de Orkney, Escocia luego de dos pruebas exitosas en el mar, en el verano del 2004. Está generando electricidad actualmente para la red conectado al cable off shore del Centro de Pruebas que lo transporta a la costa. El Pelamis tiene 150metros de largo con un diámetro de 3.5metros y un peso de aproximadamente 700 toneladas

Ocean Prospect está planeando establecer una granja pelamis de energía de olas con capacidad total de o mayor a 50MW.

Portugal es una locación muy apropiada para los proyectos mareomotrices y de energía de la ola; ya que sus recursos para esta tecnología son excelentes, además dispone de una tarifa preferencial por 12 años de 0.235/Kw euros que lo hace económicamente muy atractivo a los diseñadores. En abril de 2004, OPD ganó una licitación de 100 millones.

El proyecto de producción de energía utilizando las olas del mar diseñado por la compañía ScottishPower, filial de la empresa española Iberdrola, frente a las Islas de Orkney (Escocia), al norte de la región, que se convertirá en el más grande del mundo por capacidad instalada.

El complejo estará formado por cuatro generadores flotantes Pelamis de 160metros de longitud, denominados serpientes marinas, con una potencia de 750kW cada uno y que aprovecharán el movimiento de las olas para generar electricidad.

Los 3MW de potencia total de este proyecto permitirán el suministro de electricidad a más de 2,000 hogares, lo que convierte a esta planta de energía de las olas en la mayor del mundo por capacidad instalada.

La construcción de este prototipo comenzará en 2008 y se espera que su instalación se realice en 2009. Según los estudios iniciales, la energía proviene de las mareas se estima podría suministrar por los menos la tercera parte de las necesidades de Escocia en 2020.

4.4 Futuro Energía mareomotriz

La energía mareomotriz es una de las catorce fuentes nuevas y renovables que estudian los organismos especializados de las Naciones Unidas. Esta energía está disponible en cuales quiera clima y época del año.

Los avances actuales de la técnica, el acelerado crecimiento de la demanda energética mundial, y el siempre latente incremento en el precio de los combustibles son factores primordiales que achican cada vez más la brecha entre los costos de generación mareomotriz y los de las fuentes convencionales de energía. Así lo entienden países como Canadá e Inglaterra, donde se incorpora la misma a los planes energéticos como solución a medianos plazos en el proceso de sustitución de plantas termales.

Un conjunto de proyectos comerciales está también en desarrollo, incluida la primera “granja de olas” tal como se denominan a los campos de estas máquinas del mundo, que será instalada frente a la costa de Portugal. Un campo de turbinas mareomotrices también será construido frente a las costas de Tromso, en Noruega.

De acuerdo con una estimación efectuada por “Carbon Trust” – grupo financiado por el gobierno - Gran Bretaña podría generar el 20% de la electricidad que necesita, a partir de las olas y corrientes. Esto es cerca de 12.000 MW diarios, equivalentes al triple de la producción actual de la mayor planta de producción británica. De hecho, Inglaterra y Escocia se han convertido en laboratorios experimentales de energía oceánica.

Uno de los centros de investigación a, en Newcastle, está sometiendo a prueba diseños marinos en tanques de olas, y otro está desplegando los suyos en las agitadas aguas adyacentes a las islas Orkney, en el extremo norte de Escocia. El gobierno escocés se ha propuesto para el 2010, generar el 18% de su energía a partir de fuentes renovables.

Desde 1999, el gobierno ha destinado más de 47 millones de dólares en investigación y desarrollo, 93 millones para comercializar dicha investigación y fondos adicionales para incorporar la energía al sistema eléctrico [8].

Una Empresa chilena e israelí crearon un proyecto para generar electricidad mediante la fuerza del oleaje, en las cuatro mil 30 kilómetros de costa.

El sistema funciona gracias a pedales activados por las olas, lo que genera presión con el soporte. La energía es transmitida a un contenedor, allí se acumula para ser liberada a un motor hidráulico que la conectará a un generador de electricidad convencional.

4.5 Proyecto en México

La Comisión Federal de Electricidad genera electricidad a base de olas, concretamente en (CFE) Rosarito, Baja California, a 30kilómetros del sur de Tijuana y cerca de la frontera de México con Estados Unidos.

Mediante un proyecto piloto que utilizaría tecnología de patente australiana Oceanlinx Ltd (energía de oleaje de columna de agua oscilante, OWC por sus siglas en inglés), la Subdirección de Construcción y Coordinación de Proyectos Hidroeléctrico de esa dependencia señala que se trata de una planta tipo plataforma petrolera con una potencia esperada de 750kW.

CFE sostiene que el proyecto piloto responde a la estrategia nacional de cambio climático relacionada con la meta de instalar una capacidad de 7 mil megawatts (Mw) y así generar 16 mil gigawatts-hora (GWh) por año.

La siguiente imagen 4.1 ilustra la tecnología de Oceanlinx Ltd (compañía australiana) que se usara. Lo interesante de esta tecnología es que las olas impulsan el aire a través de una turbina que genera electricidad.

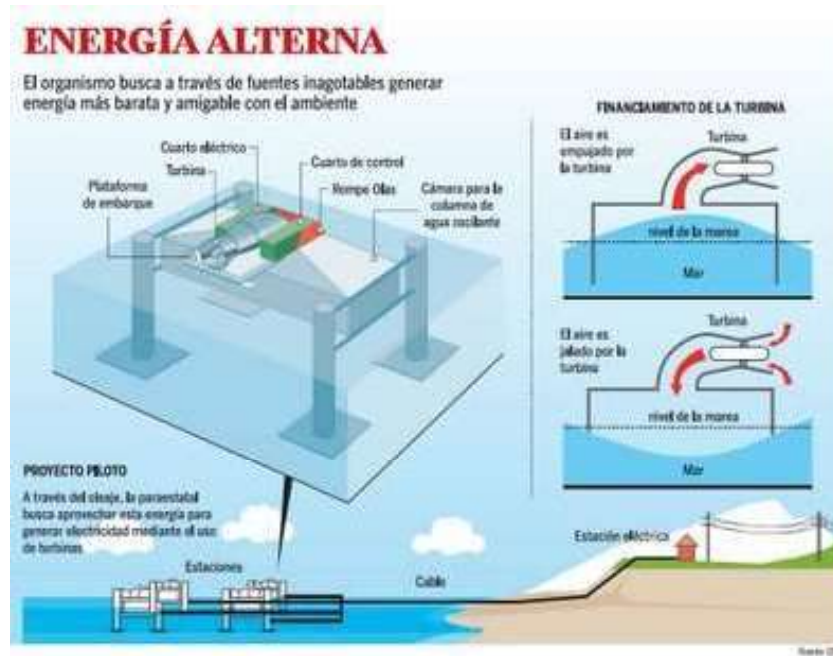


Figura 4.1 Tecnología que utilizara CFE en Rosarito,BC

Finalmente, este proyecto de la CFE una magnífica alternativa al uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, ya que no genera contaminación. Además, ayudaría a reducir nuestra dependencia del petróleo y reducir los problemas que causa [12].

4.6 Costos

Es un recurso hidráulico que tiene analogía con la hidroelectricidad. La energía maremotriz puede aportar 635,000GW/h anuales lo equivalente a unos 1,045,000,000 barriles de petróleo o 392,000,000 toneladas carbón/año.

Se considera que los lugares más viables para aprovechar esta energía son unos 40, que rendirían unos: 350.000 GW/h anuales. Para obtener esta cantidad de energía sería necesario quemar unos 220 millones de barriles de petróleo/año [7].

La central maremotriz fue la de Rance, en Francia, que estuvo funcionando casi dos décadas desde 1967. Consistía en una presa de 720metros de largo, que creaba una cuenca de 22 Km². Tenía una esclusa para la navegación y una central con 24 turbinas de bulbo y seis aliviaderos, y generaba 240MW. Desde el punto de vista técnico-

económico funcionaba muy satisfactoriamente. Rance producía 500 GW/año: 300,000 barriles de petróleo.

Las futuras "granjas marítimas" utilizarán una nueva generación de boyas de 500 kW de capacidad. Las boyas generadoras ofrecen entre 80 y 90% de disponibilidad, un rendimiento comparable con plantas convencionales funcionando con combustibles fósiles, superior a la eólica (30 a 45% de disponibilidad) y la solar que sólo tiene un 20-30 % de capacidad.

Las boyas, además utilizan muy poco espacio por MW que las granjas eólicas y las plantas convencionales basadas en tierra firme. Ocean Power estima que una planta de 100MW será capaz de producir a un costo de 3-4 centavos por kW, incluyendo gastos de operación y mantenimiento y la amortización de capital por el costo del equipo y su instalación, muy bajos comparados con los 5-6 centavos actualmente en uso para la eólica.

Una planta de 10 MW en base a este sistema ocuparía 2km² de espacio oceánico, sin amenazar la vida marina, sin ruido ni contaminación; sin estorbo a la vista. Asimismo, las boyas son un aliado muy interesante para combatir la erosión de las playas.

Los gastos de explotación totales de generar energía eléctrica en una central eléctrica undimotriz se proyectan para ser solamente (los E.E.U.U.) 3-4¢/KWH para los sistemas 100MW y (los E.E.U.U.) 7-10¢/kWh para las plantas 1MW, incluyendo gastos del mantenimiento y de explotación, así como el coste de capital amortizado del equipo.

Costas afueras de Japón donde la firma socia de Ocean Power, Penta Ocean están preparando la ingeniería marítima y el respaldo financiero del proyecto.

La empresa instaló la primera boya cerca de la Bahía Kaneohe en junio del año pasado, la unidad está ubicada a 1km de la costa donde el mar tiene unos 30m de profundidad, con una potencia de 50kW.

La estación generadora debió pasar por un estudio medioambiental realizado por ingenieros en concordancia con la norma National Environmental Policy Act, que

establece la necesidad de evaluación de los impactos potenciales sobre el fondo marino, los peces y organismos, la vegetación y calidad del agua. Una resolución estableció que la planta "no tiene impactos significativos" en ninguno de estos aspectos.

4.6 Ventajas y desventajas de la energía Undimotriz

La instalación de sistemas generadores de energía undimotriz tiene las siguientes ventajas:

Creación de zonas de calma: son beneficiosas en el caso de su aplicación a la acuicultura ya que permiten colocar jaulas en zonas más alejadas de la costa. De esta manera se puede disminuir el gran conflicto que existe entre este sector y el turismo, debido a los inconvenientes que ocasionan las jaulas de peces con respecto al impacto visual y a la eutrofización de las zonas cercanas (malos olores, aumento de los niveles de fitoplancton, aparición de cianobacterias tóxicas, etc.). Por otra parte, determinados sistemas de generación de energía undimotriz pueden producir zonas de calma para playas que alternativamente tendrían un rompeolas tradicional, dando una doble utilidad a estas estructuras. Esta posibilidad implica un ahorro económico importante para aquellos ayuntamientos que invierten anualmente en reabastecer sus playas de arena, ya que estas estructuras pueden disminuir la erosión costera producida por las olas.

Autoabastecimiento energético de ciertas infraestructuras del puerto: la generación de energía puede abastecer eléctricamente a los equipamientos portuarios y de ocio que se encuentren en la zona al igual que a los barcos atracados. Esto evita el tener que construir tendidos eléctricos, además de significar un ahorro económico importante para el puerto y también una reserva energética en momentos de mayor demanda.

Ciertos sistemas de generación de electricidad a partir de energía undimotriz pueden incorporarse sobre las estructuras tradicionales de un puerto (diques, rompeolas, etc.), dando a estos elementos múltiples usos y por lo tanto un valor añadido importante. Este concepto es extrapolable a otros puertos del mundo, cuyas infraestructuras pueden adoptar una doble utilidad al tener el potencial de generar energía renovable.

Nuevas fuentes de ingresos para un puerto: Es interesante para los puertos incorporar la energía que producen los sistemas de energía undimotriz a la red eléctrica general, ya que la venta de esta energía proporciona ingresos adicionales al puerto y permite amortizar más rápidamente la inversión [9].

Desventajas de la energía undimotriz

Impacto visual de las centrales maremotrices, riesgo de colisión de los barcos existen pocos lugares aptos para la ubicación de centrales maremotrices. Las instalaciones corren el riesgo de sufrir las consecuencias de tifones y tsunamis esto para el caso de centrales undimotrices. Los problemas medioambientales: aterramiento del río, cambios de salinidad en el estuario, cambios en el ecosistema antes y después de la instalación [9].

4.8 Comparación energía eólica

Una central undimotriz de 10 MW:

Evita: 28.480 Tn. Al año de CO₂.

Sustituye: 2.447 Tep. toneladas equivalentes de petróleo.

Aporta: Trabajo a 130 personas al año durante el diseño y la construcción.

Proporciona: Industria y desarrollo de tecnología.

Genera: Energía eléctrica para 11.000 familias.

Parques eólicos

Un parque eólico conformado por 15 aerogeneradores Nordex N60/250 –1.3 MW cada uno, para un total de 19.5MW de capacidad instalada. Los aerogeneradores están compuestos por un rotor de 60metros de diámetro y un generador instalado sobre una torre de 60metros de altura; su distribución es de dos filas de 8 y 7 aerogeneradores respectivamente, separadas aproximadamente 1000metros. La distancia promedio entre aerogeneradores es de 180m.

La zona que ocupan las turbinas comprende un área rectangular de aproximadamente un 1km de ancho por 1.2km de largo.

Otro ejemplo de un parque eólico constituido por 16 aerogeneradores de una potencia nominal de generación de 2MW cada uno. Las turbinas se instalarán sobre torres tubulares troncocónicas de una altura de buje de 80m y diámetro de barrido de rotor de 90 metros.

El estudio del litoral prevé que los aerogeneradores sean mucho más grandes que los de tierra. Según afirma el documento, las palas tendrán 45 metros de largo y la torre se levantará 80 metros sobre la superficie marina. Además, y de acuerdo con la información recogida de proyectos marinos ya construidos en otros países, tanto las inversiones como los costos de operación y mantenimiento llegan a duplicar los valores alcanzados en los parques en tierra. Pero el escollo más importante para el desarrollo de esta energía es la falta de infraestructuras eléctricas.

Ocean Power instaló una unidad está ubicada a 1km de la costa donde el mar tiene unos 30metros de profundidad, con una potencia de 50kW.

El dispositivo de la figura 4.2 bien podría competir con un aerogenerador y es más pequeño en sus dimensiones además de no emitir el ruido que produce un aerogenerador y como va sumergido, no tiene el mismo impacto visual que un aerogenerador.



Figura 4.2 Muestra la colocación de un prototipo para aprovechar el salto de olas

Los científicos de la Universidad del Estado de Oregon calculan que apenas 0.2% de la energía sin aprovechar de los océanos del mundo resolvería las necesidades de energía del planeta entero, que podría tener una capacidad de generación de 100MW, suficiente para entregar energía a 15,000 hogares de la zona.

La planta de Santoña (Cantabria, España), que podría atender al consumo doméstico anual de unos 2,500 hogares, es la primera de este tipo que se pone en marcha en Europa y se suma a otro proyecto que la empresa tiene en Escocia. Las boyas utilizadas en este proyecto serian de tipo de la ilustración 4.3 [6].

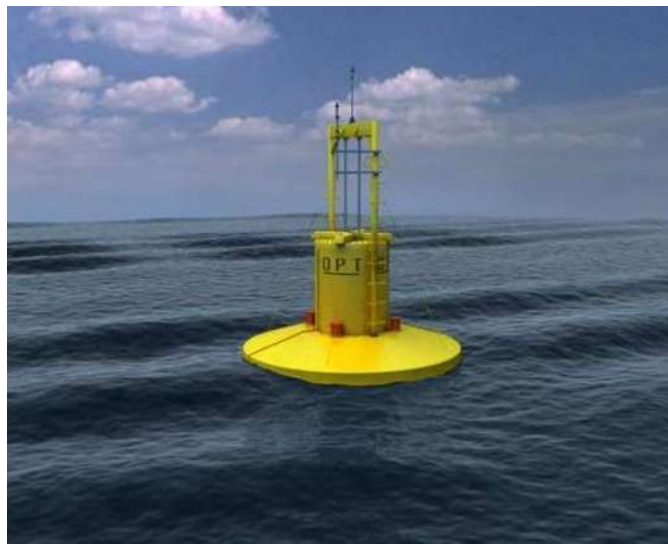


Figura 4.3 Muestra una boya generadora de 125kW.

Las pruebas de funcionamiento de los componentes internos de la primera boya, fabricados en Estados Unidos y denominados Power Take Off (PTO) se han iniciado en tierra, según informa Iberdrola Renovables. Los PTO son los módulos a través de los cuales se capta y transforma la energía de las olas para almacenarla y, posteriormente, evacuarla en condiciones óptimas. Dichos módulos se introducen e instalan en un compartimento cilíndrico estanco –el fuste de la boya– de 20metros de longitud.

La instalación se ubicará a cuatro kilómetros de la costa de Santoña y estará compuesta por 10 boyas con baliza. En una primera fase se instalará una boya de 40kW de unos diez metros de diámetro, sujeta mediante tres boyas semisumergidas ancladas al fondo marino a una profundidad de alrededor de 50 metros. Las restantes nueve boyas,

previstas para una fase posterior, cuentan con una potencia inicial de 125kW. Cuando se encuentren en funcionamiento las 10 boyas, la producción eléctrica anual de esta planta equivaldría aproximadamente al consumo doméstico de unos, 500 hogares. En la figura 4.4 se muestra una “granja marina”

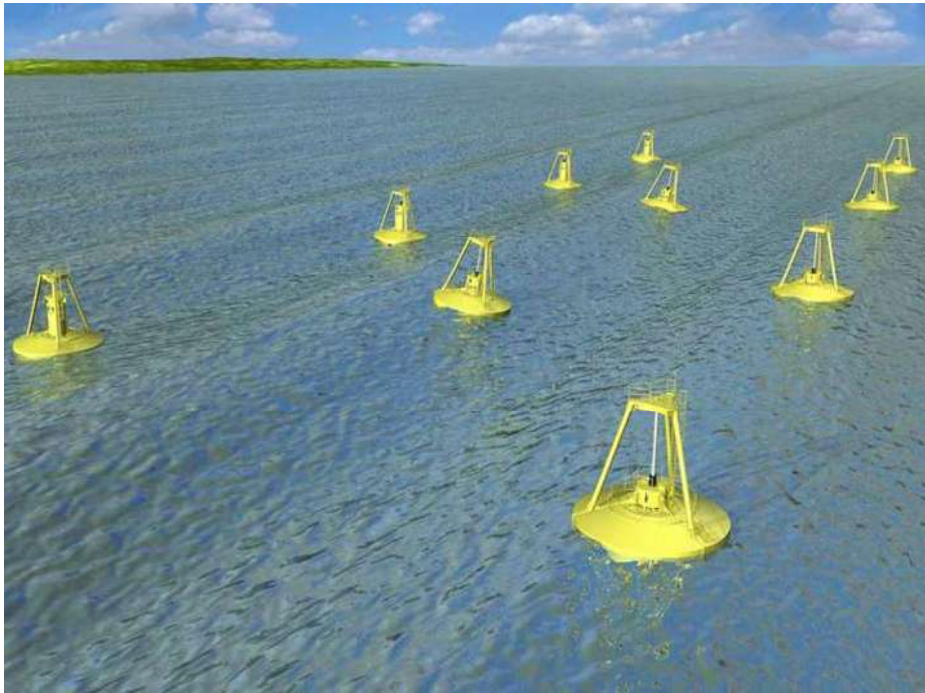


Figura 4.4 Muestra la colocación de de boyas en una “granja marina”

Una de las mayores ventajas que tienen la undimotriz sobre la eólica es que las dimensiones de los aerogeneradores supera por mucho las de la boyas como se puede ver en la figura 4.5.

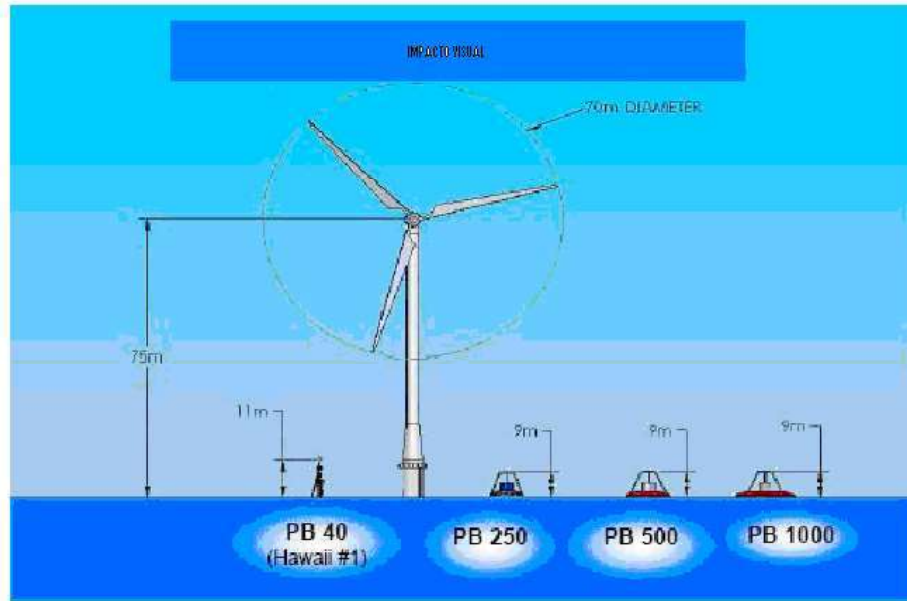


Figura 4.5 Muestra claramente la diferencia entre la dimisiones de los aerogenerado comparadas con las boyas.

4.9 Resultados obtenidos del prototipo

El voltaje que se induce en nuestra bobina es producido por los siguientes parámetros físicos:

$$V_{\max} = \left(\frac{24 * 4 * \pi * 10^{-7} m N v}{(\sqrt{5})^5 b^2} \right) \quad (4.1)$$

- La velocidad constante del imán v en cm/s,
- El radio b de la bobina en cm.
- El momento m bipolar magnético
- El número de espiras N de la bobina

Como se explico en el capitulo 3, el voltaje registrado a la salida de la bobina es inducido; esto se debe a un principio físico descubierto por Faraday hace casi 200 años [2].

De esta ley se desprende algunas ecuaciones como la ecuación 4.1 con la cual podemos calcular el valor máximo de fem producida por el desplazamiento del imán a través del solenoide como se ilustra en la figura 4.6

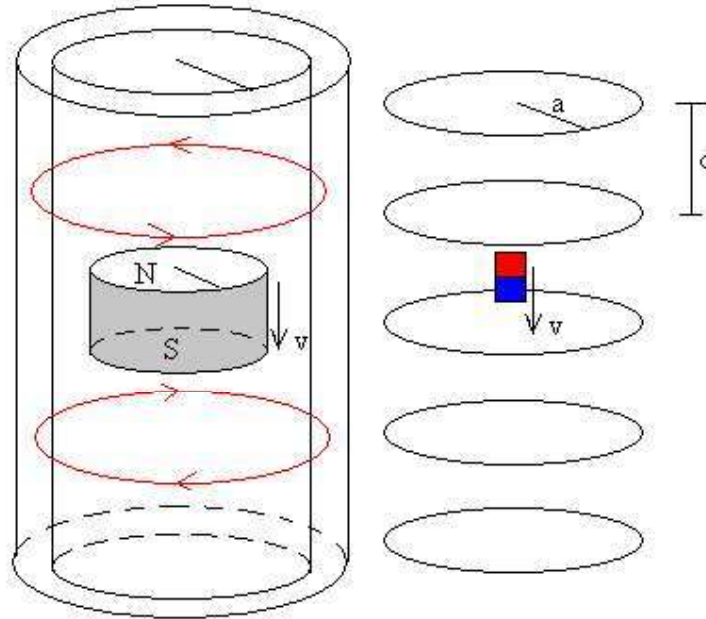


Figura 4.6 Mover con una velocidad un imán dentro del diámetro de una espira se inducirá en esta un voltaje.

El valor máximo de la fem es dada por la ecuación 4.1 la velocidad es producida por el desplazamiento de la boya; en su movimiento vertical de acenso y de censo debido la ola.

$$V_{\max} = \frac{24\mu_0 m N v}{(5) a^2} \quad (4.1)$$

Donde:

V_{\max} = Valor máximo de la fem

m = Momento magnético

N = Número de espiras

V = Velocidad con la que se desplaza el imán dentro de la bobina cm/seg

b = Diámetro de la bobina en cm

$$V_{\max} = \frac{24 * 4 * \pi * 10^{-7} * (2.35) * (3000) * (0.0015)}{(\sqrt{5})^5 * (0.01)^2} = 0.057 \text{volts}$$

Vmax= 0.057 volts es el valor máximo inducido que se espera en nuestro prototipo en la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos en la pruebas realizadas.

Tabla 4.1 resultados de los experimentos realizados al modelo

Voltaje aplicado al generador de olas	Voltaje inducido en las terminales de la bobina en volts	Velocidad de la boya en m/seg.
4	0.020	0.00050
4.5	0.024	0.00060
5	0.028	0.00070
5.5	0.034	0.00080
6	0.037	0.009
6.5	0.048	0.001
7	0.056	0.0012
7.32	0.020 – 0.070	0.0015

La columna 1 de la tabla anterior muestra el voltaje aplicado al generador de olas; la amplitud, longitud y velocidad de traslado de la ola depende directamente del voltaje aplicado al generador de olas a mayor voltaje se incrementa estos parámetros de la ola y por ende también la velocidad de la boya; con un voltaje mínimo de 4 volts se generan olas capaces de mover la boya a través de la bobina e inducir un voltaje de 0.00020 volts.

Si el valor de voltaje aplicado al generador de olas es inferior a 4volts; el oleaje generado es pequeño e incapaz de desplazar un movimiento vertical a la boya; haciendo imposible la inducción de voltaje en el dispositivo.

La segunda columna muestra el voltaje inducido en las terminales de salida de la bobina con diferentes magnitudes de olas; este voltaje es consecuencia de la ley de Faraday que establece que: “La corriente inducida en un circuito es directamente

proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético que lo atraviesa” se genera una corriente directa, CD, en las terminales de sistema Boya_magneto_inductor. De esta manera el prototipo diseñado y construido pretende dar una idea clara de que en base la energía undimotriz es una forma sencilla y útil de generar energía eléctrica.

La última columna registra la velocidad de la boya, con que se desplaza dentro del núcleo de la bobina, la velocidad de la boya depende de la altura y frecuencia con que se traslada la ola a lo largo del estanque.

El valor de 7.32 volts en este punto se logra formar un tren de ola donde la longitud de ola es mucho mayor que la altura creando una situación ideal para alcanzar el máximo valor de generación es en este punto donde la boya aprovecha más el movimiento de ascenso y descenso producido por las olas generadas artificialmente.

La velocidad de desplazamiento del tren de ola es de 1.77cm/seg; y para este caso es constante debido a que la profundidad (h) es la misma en cualquier punto del estanque.

Excepto donde se encuentra la malla con grava arena; y es precisamente donde el tren de olas se rompe por lo tanto su velocidad se reduce a cero.

$$w = \sqrt{\frac{g}{k} * \tanh(h * k)} \quad (3.3)$$

Donde

$$h = 15\text{cm}$$

$$k = \frac{2\pi}{L}, \text{ Número de onda}$$

$$\text{La longitud de ola} = 1.2 \text{ cm}$$

Cuando uno tiene el voltaje de 0.030 a 0.070 volts parece muy poco pero si observa de nuevo la ecuación 4.1 de máximo valor inducido

$$V_{\text{max}} = \frac{24\mu_{\text{m}}h\nu}{(\sqrt{5})^2} \quad (4.1)$$

Se puede dar uno cuenta que al modificar el valor en numerador esto aumenta por ejemplo los dispositivos actuales trabajan para alturas de 1 a 6 metros con períodos

desde $T=4$ a $T= 10$ segundos si en nuestro dispositivo variamos la velocidad en 1m/s obtendremos el siguiente resultado $V_{max}= 38.035$ volts.

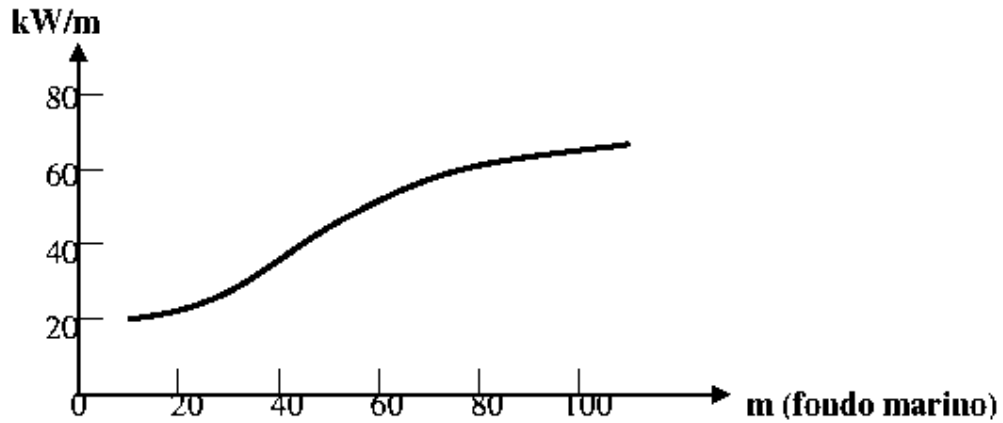
Ahora imaginemos que mantenemos el valor de 1m/seg. pero incrementamos el numero de vueltas de 3000 a 30000 y todos lo demás valores se mantienen iguales.

El resultado es 380.35 volts.

Lo anterior demuestra que un prototipo de esta clase tiene un potencial, tan con variar el número de vueltas en la bobina y la velocidad se incrementa el voltaje inducido sin olvidar que nuestro dispositivo depende directamente de la elevación y descenso de la ola: En un prototipo de mayor escala se necesita un sistema mecánico a base de engranes y multiplicadores de velocidad capaces de incrementar considerablemente la velocidad y aunque el radio de la bobina también aumente será mayor el numero de vueltas construyendo bobinas con súper conductores(resistencia nula), la velocidad y el momento magnético ya que este lo aportara imanes capaces de producir un campo magnético mayor por ejemplo para incrementar el campo se puede utilizar imanes de última generación lo cuales se utilizan en los trenes de levitación magnética.

Por citar un ejemplo del poder de campo magnético el primer electroimán fue inventado por el electricista británico William Sturgeon en 1825. El primer electroimán era un trozo de hierro con forma de herradura envuelto por una bobina enrollada sobre él. Sturgeon demostró su potencia levantando 4kg con un trozo de hierro de 20g envuelto en cables por los que hizo circular la corriente de una batería.

Además de estos factores se debe considerar en mar abierto. La variación de la energía de ondas a medida que nos alejamos de las costas y se hace más profundo el fondo marino se presenta en la grafica de la figura 4.7



Desgraciadamente, el tamaño de las olas no aumenta linealmente con la profundidad sino de forma exponencial como se muestra en la figura 4.7

La forma típica de la gráfica de la figura 4.8, donde los números dentro del mismo representan el número de veces al año en que las condiciones de altura H y el periodo T de las olas ocurren.

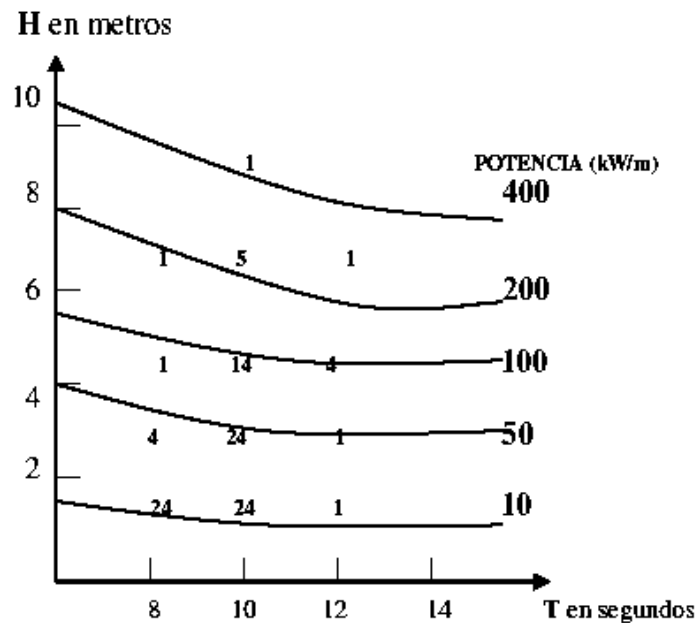


Figura 4.8 Ocurrencia de olas y generación de potencia. De la gráfica de la figura 4.8 podemos deducir que a mayor altura de la ola, mayor es la potencia que se puede obtener de ella.

CAPITULO 5

Conclusiones y recomendaciones

Principales obstáculos

Para el caso de la energía undimotriz, deben superarse aun algunos retos tecnológicos específicos como la construcción de centrales undimotrices de gran escala, desarrollo de materiales, instalaciones y experiencia necesarios para lograr una madures tecnológica. Asimismo, empresas que exploten lo que en el futuro será un mercado altamente especializado.

5.1 Conclusiones

Conclusiones del prototipo El prototipo no es difícil de construir, se logró obtener valores esperados que bien podríamos considerar para el estudio de un prototipo de mayor escala, una de las observaciones que salta a primera vista cuando se trabaja con el dispositivo es que mayor eficiencia se logra cuando el generador de olas produce olas de mayor longitud a su altura, esto se logró aplicando un voltaje a las terminales del generador de olas como mínimo de 4volts y máximo 7.32 volts si sobrepasamos el valor máximo se generan olas de mayor altura que su longitud haciendo imposible el control de la boya ya que la fuerza del oleaje es inestable e incontrolable, lo cual también sucede en alta mar cuando hay un oleaje que sobre pasa los 6metros de altura; por el contrario con un oleaje débil no se logra que la boya se desplace con suficiente altura y velocidad a través de la bobina haciendo imposible la inducción de voltaje en las terminales de salida. Por lo que se concluye a menor velocidad del generador de olas; menor la altura de ola y frecuencias (de olas) mas altas a consecuencia de periodos mas bajos. Lo que da como resultado un registro de voltaje en las terminales de la bobina bajo; debido a que nuestro dispositivo electro-magneto-mecánico, depende de la altura de ola.

En la tabla 4.1 si comparamos los valores registrados notamos que cuando incremento el voltaje que alimenta el generador de olas, se aumenta la velocidad de propagación de la ola y a mayor velocidad de ola aumenta la amplitud de la misma; la amplitud en la ola provoca que el imán recorra una longitud mayor dentro del núcleo y con una velocidad mayor aumenta el número de veces que el imán recorre el núcleo de la bobina por lo que se incrementa el voltaje inducido en las terminales de la bobina.

Nuestro prototipo entra en la clasificación de dispositivos de segunda generación, dado que depende totalmente de las componentes de la ola (periodo, altura y longitud), así como de la velocidad de propagación de la misma, por lo que sus inconvenientes derivan principalmente de la fiabilidad de los caudales y de la interconexión eléctrica. La figura 5.1 muestra el significado de este enunciado.

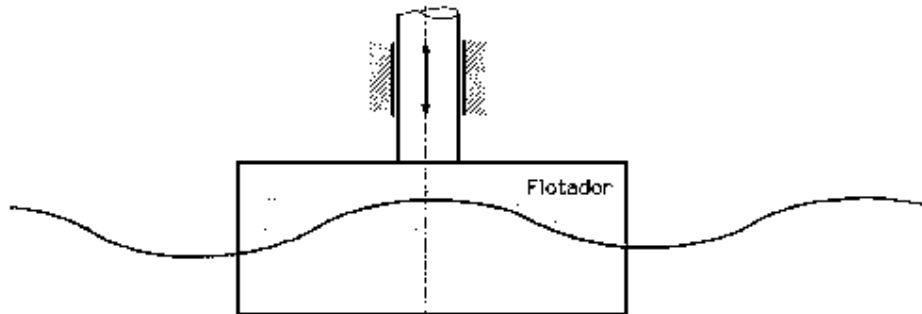


Figura 5.21 Aprovechamiento de la variación de la altura de la superficie de la ola.

Este prototipo a escala se nota con claridad que la mejor forma de aprovechar el potencial de energía de ola es construir un sistema de control que vaya entre la boya y la bobina para que se aproveche al máximo el movimiento de sube y baja de la boya manteniendo el voltaje constante para que este no este oscilando en valores como se vio en la tabla 4.1, sino por lo contrario se mantenga lo mas cercano al valor calculado con la ecuación 4.1.

El desarrollo de esta fuerza se lleva investigando desde hace un tiempo relativamente corto, por lo que los dispositivos tienen un amplio margen de evolución.

El gran obstáculo es financiero. La energía de las olas no fue diseñada para ahorrar dinero sino para salvar el mundo.

Lo cierto es que el agua tiene una densidad 800 veces mayor que el aire, con lo que algunos dispositivos marinos plantados en una área relativamente pequeña pueden generar tanta energía como un gran parque eólico.

Con el tiempo, los altos costos iniciales de desarrollo e investigaciones nivelaran, y las tecnologías individuales se volverán mas económicamente eficaces. Una vez que un dispositivo se establezca en el mercado, la producción en serie producirá la baja drástica de los costos.

Es un tipo de energía renovable y limpia, sin embargo, la relación entre la cantidad de energía que se puede obtener con los medios actuales y el costo económico y ambiental de instalar los dispositivos para su proceso han impedido una proliferación notable de este tipo de energía, lo cual nos invita a trabajar para una mejora en su implementación de manera de reducir costos y aumentar eficacia. Un gran proyecto a futuro para nuestro dispositivo sería utilizarlo en campos de boyas formando una central generadora de energía eléctrica mediante olas.

Además, se pueden deducir beneficios sociales relativos al mantenimiento del empleo en sectores como el naval y pesquero, la promoción de nuevas actividades económicas sostenibles y la mejora en la calidad de vida de la sociedad al mitigar las emisiones de CO₂.

Si la energía marina reemplazara la combustión de combustibles fósiles como el carbón, podría reducirse el total de emisiones de dióxido de carbono y posiblemente incrementarse la diversidad y seguridad de la provisión de energía.

Hasta ahora las actuaciones más representativas en el medio marino se han centrado en captar la energía cinética de corrientes marinas relacionadas con los desniveles producidos por las mareas. Sin embargo, el aprovechamiento de la energía de las olas es un enfoque innovador que aún está por desarrollar. El presente proyecto nace con el propósito de fomentar el uso de la energía proveniente de las olas (energía undimotriz).

Con este trabajo que se ha demostrado que el océano tiene un infinito potencial en donde los ingenieros en conjunto con la industria y el gobierno, tiene el derecho y obligación de aprovechar esta energía al máximo, y en especial la energía de las olas, pero todavía hay mucho que hacer para probar su competitividad. La clave es la optimización. Los importantes márgenes de beneficio de la industria del petróleo no son de aplicación para la energía de las olas. Los costos de construcción, explotación y mantenimiento han de ser los mínimos y la potencia de salida debe ser la máxima para garantizar una explotación rentable a largo plazo. Aunque es pronto para decir que se convertirá en una nueva industria, pero de ser así, México de ve estar bien situado para hacerse con una parte importante de nuevo mercado. Por esto la importancia de incorporar la nueva tecnología que se esta desarrollando en otros países para entenderla e imitarla, y en un futuro poder lograr mejorar o innovar en esta área, pero esto solo se logra con la investigación y documentación por parte de un sector que juega un papel importante en el desarrollo tecnológico de un país como el nuestro y es el de los profesionistas.

En el desarrollo de este trabajo observe que en los últimos 30 años se ha avanzado enormemente en cuanto a esta tecnología. Dentro de poco, será posible obtener la electricidad de las olas de la red de suministro en muchos países a enormemente las instalaciones.

Se trata de una energía limpia, totalmente renovable, silenciosa y poco visible. Presenta un bajo impacto ambiental. Su viabilidad económica está de momento muy interrelacionada con la tarifa prima eléctrica. Alto potencial en la costa norte de México (Posible futuros proyectos de 100 MW).

5.2 Recomendaciones

Para afrontar un desafío de montar un prototipo de esta clase es necesario apoyarse en varias disciplinas de ingeniería entre ellas ingeniería civil, la ingeniería eléctrica y la ingeniería de control. Un proyecto que no integre estas disciplinas esta condenado al fracaso.

Las olas concentran una gran cantidad de energía cinética, pero el número de ciclos por minuto es muy bajo, entre 3 y 30 ciclos por minuto; para obtener energía eléctrica a partir de este movimiento hay que utilizar convertidores que conviertan estas bajas frecuencias en otras mucho más altas necesarias para producir energía eléctrica, con las grandes pérdidas de energía que estas conversiones conllevan.

Una red de diez boyas distribuidas en 2,000 metros cuadrados proporcionará toda la electricidad que consumen 1.500 hogares.

Las boyas deben colocarse a 1.5 y 3km de distancia de la costa con una profundidad mínima de 50 metros donde le promedio de la altura de las olas sea cercano a los 2 metros como mínimo y 6 metros como máximo.

Para construir un proyecto capaz de satisfacer una comunidad emplearemos un modelo muy parecido al que utilizan la compañía española hidroflog que consiste en una plataforma de 36*36m y una altura de 8 metros donde se colocaran 16 boyas de 6 metros de diámetro con un peso de 480kg . La plataforma evita que la boyas tengan que anclarse al fondo marino y logrando una mayor estabilidad del sistema, además de que protección contra el mal tiempo del equipo; también la plataforma facilita el mantenimiento o sustitución de un equipo dañado 2.52MW con olas de 6 metros de altura con un período de 9 segundos. Esta energía, equivalente a la que proporciona una turbina eólica, es suficiente para abastecer 600 hogares. El objetivo es producir energía a un costo de 2.8 euros/kWh. El costo de construcción de cada plataforma se estima en 3 a 4 millones de euros. Físicamente nuestra propuesta sigue la siguiente estructura mostrada en la figura 5.2



Figura 5.3 Plataforma undimotriz

Bibliografía

[1] MECÁNICA DE FLUIDOS

White (Editorial McGraw-Hill)

5ª edición

Fundamentos y Aplicaciones de la
Mecánica de los fluidos
McGraw-hill (2005, 1ª edición)

Autor Barrero

[2] FUNDAMENTOS DE FÍSICA

Editorial CECSA

6ª edición

Autores Halliday / Resnick / Walker

REFERENCIAS

[3] <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/EnergiasAlternativas/mar/PDFs/1MA REAS.pdf>

[4] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia18/HTML/articulo05.htm>
(energía del mar)

[5] http://www.gabinete.org.ar/Noviembre_2005/naval.htm.

[6] <http://www.google.com.mx/search?q=mareomotrices&hl=es&client=firefox-a&channel=s&rls=org.mozilla>

[7] http://www.ubu.es/investig/aulavirtual/trabajos_07/Las_energias_en_nuestra_comarca/otras/pagina17.htm

[8] http://www.zientzia.net/teknoskopioa/2006/itsas_energia_g.asp

[9] <http://www.caballano.com/bulbo.htm>

[10] <http://waste.ideal.es/energiadelmar.htm>

[11] http://www.imacmexico.org/ev_en.php?ID=17218_201&ID2=DO_TOPIC

[12] <http://miquelgisbert.iespana.es/miquelgisbert/penya/pagines/mareomotrices.htm>

[13] <http://www.paranauticos.com/notas/Tecnicas/Mareas/tipos-mareas.htm>