



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Eléctrica

**Modelado de un Sistema de Generación de Energía
Eléctrica basado en Energía Undimotriz**

**Que para obtener el Título de
INGENIERO ELECTRICISTA**

Presenta

Josué Oswaldo Vázquez Villaseñor

Asesor de Tesis

Dr. Gilberto González Avalos

Marzo del 2012

Agradecimiento

Por esta tesis, pero sobre todo, por estos cinco años que compartimos:

Con mucho cariño principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por todo papá y mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor, por todo esto les agradezco que estén conmigo a mi lado.

A mi asesor, el Doctor Gilberto González Avalos, que sin su apoyo y ayuda este trabajo no hubiera sido una realidad.

A mis amigos, los que han pasado y se han quedado, porque todos ustedes han sido tantas veces parte aguas de mi vida, han marcado mi vida de alguna forma y me han abierto los ojos al mundo.

A mis profesores y profesoras que me enseñaron más que números y letras.

Dedicatoria

Me gustaría dedicar esta Tesis a toda mi familia.

Para mis padres Santiago y María, por su comprensión y ayuda en momentos malos y menos malos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

Gracias a la vida que tengo y a mis amigos que más quiero. Si no fuera por ellos mi sueño no lo habría cumplido.

No tengo letras para seguir diciendo el gran regocijo que me da poder terminar esta carrera en donde profesores y compañeros dejan parte de su vida, para dar vida a las ilusiones de niño y que hoy en día se hacen realidad.

Solo sé que este camino es solo el comienzo de una gran historia.

Resumen

El presente trabajo consiste en el diseño de un sistema de obtención de la energía de las olas para ser convertida en electricidad. El objetivo es que éste pueda ser utilizado en aplicaciones de pequeña y mediana escala ubicadas en el borde costero, las cuales se encuentren alejadas de la red eléctrica de potencia. Se busca obtener un producto económico y limpio que resulte ser una alternativa válida frente a la generación de electricidad con combustibles fósiles.

Con el fin de contextualizar la generación de electricidad a partir de la energía de las olas, se hace una revisión de las formas de extracción de energía a partir del océano, sus manifestaciones y los principios de conversión. Además se hace una revisión de distintas tecnologías de generación que actualmente se encuentran en funcionamiento o en fase de investigación.

Tomando como punto de partida un prototipo existente de obtención de energía a partir de las olas, se especifican y dimensionan los dispositivos elementales para llevar a cabo la conversión mecánica, obteniendo como resultado una rotación a velocidad variable de un eje que puede ser acoplado a un generador eléctrico.

La utilización de un generador sincrónico de imanes permanentes resulta ser la mejor alternativa frente a un escenario alejado de la red eléctrica de potencia y un rotor que gira a velocidad variable. La solución representa un menor costo de inversión y mantención, además de mayor eficiencia frente a su símil, el generador sincrónico con control de excitación.

Contenido

AGRADECIMIENTO.....	II
DEDICATORIA	III
RESUMEN	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS.....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	IX
CAPÍTULO 1	1
1.1 Fuentes alternas de generación	1
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Justificación	4
1.4 Estructura de la tesis.....	5
CAPÍTULO 2	6
2.1 El mar como fuente de energía	6
2.2 Energía undimotriz en el mundo	10
2.3 Energía undimotriz en México	13
2.4 Obtención de la energía undimotriz.....	14
2.4.1 Pelamis	15
2.4.1.1 Principio Básico	15
2.4.1.2 Funcionamiento	16
2.4.2 Columpio de olas Arquímedes.....	17
2.4.2.1 Principio Básico	18
2.4.2.2 Requisitos para su instalación.....	18
2.4.2.3 Ventajas del sistema	19
2.4.2.4 Actual aplicación	19
2.4.3 Dragón de las olas	20
2.4.3.1 Tecnología	20
2.4.3.2 Principio de funcionamiento	21
2.4.4 Columna Oscilante de Agua	22

2.4.4.1 Actuales aplicaciones	23
2.4.5 Dispositivos Tecnológico OPT	24
2.5 Ventajas y desventajas de la energía undimotriz	26
CAPÍTULO 3	31
3.1 Distribución de la energía de las olas	31
3.2 Comportamiento del oleaje real.....	32
3.3 Cantidad de energía eléctrica en las olas	34
3.4 Energía eléctrica de las olas en México	36
3.5 Características básicas del generador	38
3.6 Diseño básico del generador.....	40
3.7 Comportamiento del generador a diferentes velocidades	44
CAPÍTULO 4	46
4.1 Introducción	46
4.2 Selección del tipo de OWC de generación	48
4.3 Sistema de generación	49
4.4 Comparación con otras alternativas de generación.....	51
4.4.1 Energía térmica	51
4.4.2 Energía hidráulica.....	53
4.4.3 Energía eólica y fotovoltaica	54
4.4.4 Energía undimotriz	56
4.5 Generalización del sistema	58
4.5.1 Propuesta del proyecto	60
CAPÍTULO 5	69
5.1 Conclusiones	69
5.2 Recomendaciones.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	73

Lista de Figuras

Figura 2.1 Precios del barril de petróleo.	7
Figura 2.2 Evolución y previsión del consumo energético mundial.	7
Figura 2.4 Potencia de las olas en el mundo.	9
Figura 2.5 Fotografía real del Pelamis.	16
Figura 2.6 Transmisión de la energía eléctrica a la costa.	17
Figura 2.7 Configuración del columpio de Arquímedes.	17
Figura 2.8 Aplicación real del columpio de olas de Arquímedes.	20
Figura 2.9 Wave Dragon en operación.	21
Figura 2.10 Columna Oscilante de Agua.	23
Figura 2.11 Sistema undimotriz con boya.	24
Figura 2.12 Configuración de la PowerBuoy.	25
Figura 2.13 Comparación de impacto visual.	29
Figura 3.1 Potencia de las olas en el mundo.	31
Figura 3.2 Muestra real del comportamiento de las olas.	32
Figura 3.3 Muestra de un tren de olas real.	33
Figura 3.4 Representación gráfica de olas.	33
Figura 3.5 Energías presentes en las olas.	34
Figura 3.6 Rotor devanado con imanes permanentes.	42
Figura 3.7 Vista frontal y lateral del rotor.	43
Figura 3.8 Dimensiones del rotor.	43
Figura 3.9 Devanados en las ranuras del rotor.	44
Figura 3.10 Voltaje y corriente respecto a la velocidad.	44
Figura 3.11 Potencia de salida a diferentes velocidades.	45
Figura 4.1 Sistemas de generación OWC.	48
Figura 4.2 Funcionamiento OWC.	49
Figura 4.3 Turbina Wells.	50
Figura 4.4 Diferentes plantas termoeléctricas.	52
Figura 4.5 Presa de las tres gargantas (hidroeléctrica, China).	53
Figura 4.6 Aerogenerador.	54
Figura 4.7 Panel solar.	55
Figura 4.8 Comparativa de sistemas de generación undimotriz.	56
Figura 4.9 El aire es expulsado.	58
Figura 4.10 El aire es absorbido.	59
Figura 4.11 OWC en costa y mar adentro.	59
Figura 4.12 Vistas del rotor.	64
Figura 4.13 Rotor.	64
Figura 4.14 Devanados del rotor.	65
Figura 4.15 Generador de imanes permanentes.	65
Figura 4.16 Propuesta del sistema de generación.	66
Figura 4.17 Propuesta de parque OWC.	67
Figura 4.18 Conexión a la red de los OWC's.	68

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de la energía undimotriz.....	27
Tabla 3.1 Comportamiento de las olas en la costa de Rosarito, Baja California.....	36
Tabla 3.2 Propiedades de alnicos fundidos comerciales.	41
Tabla 4.1 Diferencia entre energías renovables y convencionales.	51
Tabla 4.2 Olas en Rosarito, Baja California. [<i>Fuente: www.windguru.cz</i>].....	60
Tabla 4.3 Generación eléctrica según la velocidad.	65
Tabla 5.1 Costos de generación.....	71

Lista de Símbolos y Abreviaturas

A	Área
AWS	Columpio de Olas de Arquímedes
B	Campo magnético
C	Celeridad de la ola
CFE	Comisión Federal de Electricidad
C_g	Celeridad de grupo
$\text{Cos}(\varphi)$	Factor de potencia
ε_L	Voltaje inducido
f	Frecuencia
FE	Flujo de energía
g	Fuerza de aceleración gravitacional
H	Altura de ola
I	Corriente
i	Corriente
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético
k	Kilo
kg	Kilogramo
kWh	Kilo watt hora
L	Inductancia
M	Mega
m	Metro
N	Numero de vueltas
OPT	Ocean Power Technologies
OWC	Columna de Agua Oscilante
P	Potencia real
T	Periodo de la ola
V	Voltaje
W	Watt
w	Velocidad angular en radianes por segundo
WEC	Consejo Mundial de Energía
η	Velocidad síncrona
λ	Longitud de onda
ρ	Peso específico del agua de mar
Φ	Flujo magnético

Capítulo 1

Introducción

En la década de los 80's casi la totalidad de la energía consumida en el mundo provenía de la quema de combustibles fósiles, considerando el mismo consumo per cápita de esos años y que la población mundial llegará a 8200 millones de personas, en el 2025 se quemarán 14,000 millones de toneladas de carbón, es decir, habrá un incremento del 40%. Ello producirá una aceleración del calentamiento global del planeta y una elevación del nivel de los océanos.

Los combustibles fósiles se agotan y amenazan con provocar una catástrofe ecológica. La tecnología nuclear es muy costosa y peligrosa. La crisis energética que impactó al mundo en 1973 y que dejó casi sin combustible a los principales países del mundo, obligó a los especialistas a reformular los mecanismos de generación.

La crisis llevó a profundizar los estudios sobre las llamadas Energías Alternativas, las cuales, son fuentes de obtención de energías sin destrucción del medio ambiente, renovables, que han sido investigadas y desarrolladas en las últimas décadas.

Algunas de ellas son: Eólica, solar, geotérmica, biomasa y últimamente la energía undimotriz, a veces llamada energía ola motriz.

El actual modelo de desarrollo está soportado por uso de energía convencional (hidráulica y combustibles fósiles no renovables).

1.1 Fuentes alternas de generación

Los altos precios del petróleo han determinado en la actualidad que los grandes consumidores importadores de combustibles fósiles volteen a buscar otras fuentes de energía, llamadas alternativas, y también se quiere que sean preferentemente de carácter renovable. Estados Unidos es el gran consumidor: llega casi a los 20 millones de barriles por día, de los cuales se ha visto obligado a importar de diversas fuentes la mitad de lo que consume, esto es, aproximadamente 10

millones de barriles diarios que provienen de varias partes del mundo, de México, entre otras, y de Medio Oriente y Canadá muy principalmente, aunque Venezuela es también un abastecedor importante de ese país.

Otro factor que ha influido en que aumente el interés generalizado en todo el mundo, además de los altos precios del petróleo y del gas por ahora.

Ante este panorama se hace sumamente importante que México pudiera desarrollar e impulsar la utilización de fuentes alternas de energía renovables para aliviar de esta manera la presión sobre la producción de gas y de petróleo, debido a la declinación de las fuentes actuales de este combustible fósil, y al panorama que se ve confuso para poder, por ejemplo, explotar los fondos marinos en aguas profundas a corto plazo, así como para la refinación del gas asociado del sureste, por una parte, y por la otra el avance en firme para obtener y utilizar los yacimientos de gas seco de Burgos, terminando las obras que se llevan a cabo en la actualidad en estos yacimientos, ubicados en Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila.

La demanda a escala mundial de electricidad se doblará de los años 2002 a 2030, y la mayor parte del crecimiento se dará en los países en desarrollo, y se explica también que la generación eléctrica contará con cerca de la mitad del consumo mundial de gas natural, y también habrá absorbido entonces más de 60 por ciento de las nuevas inversiones en abastecimiento de energía desde ahora, y hasta 2030.

En el mismo periodo la participación de la generación hidroeléctrica, según los análisis de las instituciones más confiables en la materia, seguramente declinará en términos relativos, aunque su uso se incrementará en términos absolutos y todas las demás fuentes renovables ganarán en participación relativa, de manera que éstas contarán con 19 por ciento de la generación mundial de energía en el año 2030.

Entre otras fuentes alternativas de energía por desarrollarse en el futuro próximo, está la que proviene del viento, que verá su mayor incremento y participación en el mercado. La energía eólica contabilizó cerca de 0.3 por ciento del abastecimiento global de electricidad en 2002, pero la cifra se espera que sea 10 veces más grande en 2030, a menos que surgiera una oposición ambiental a la utilización del viento en las granjas que pudiera disminuir o hacer más lento el paso de su desarrollo. La potencia del viento se proyecta que supere la biomasa, como el más

grande recurso de la generación eléctrica renovable no hidráulica, para mediados de la siguiente década. Sin embargo, la generación eléctrica de biomasa triplicará sin duda la importancia entre ahora y el 2030. La potencia geotérmica crecerá a la misma tasa que la biomasa. La solar, la de las mareas y la energía de las olas harán una contribución más importante hacia el final del periodo considerado.

Últimamente, la energía undimotriz a veces llamada energía ola motriz, 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 a 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 el 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 cámara de aire 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.

1.2 Objetivo

A partir de la generación obtenida a través de la energía mecánica extraída de las olas de mar, es necesario especificar y dimensionar los dispositivos mecánicos básicos que formarán parte del sistema mecánico de conversión de energía, así como también los dispositivos eléctricos y electrónicos que formarán parte del sistema de control y generación de electricidad aislada de la red eléctrica de potencia.

Para realizar este trabajo se contemplan los siguientes objetivos específicos:

- Dar una visión de la situación actual de la obtención de energía eléctrica a partir de la energía del océano.
- Proponer y evaluar el comportamiento de un sistema mecánico de captación de energía.

- Diseñar el sistema eléctrico y de control a voltaje constante de un generador eléctrico, para que pueda cumplir con una demanda y almacenar el excedente de energía en acumuladores eléctricos.
- Modelar con la intención de estimar la potencia eléctrica que se podría generar.
- Sugerir dispositivos presentes en el mercado que cumplan con las características del diseño propuesto.

1.3 Justificación

Este trabajo contribuye en nuestro aprendizaje de modo que analicemos y aprendamos contribuir a un mejor ahorro y buen uso de la energía. Además, ahorrar energía tiene otras ventajas adicionales para el medio ambiente, ya que con ello evitamos; lluvias ácidas, mareas negras, contaminación del aire, residuos radiactivos, riesgo de accidentes nucleares, proliferación de armas atómicas, destrucción de bosques, devastación de parajes naturales, desertificación.

Beneficiará a una comunidad o a un sector de la sociedad gracias a que viven en zonas de ríos y lagos o zonas costeras para que la energía que se genere en ese lugar se lleve a la población de los alrededores y se solventarían los problemas de ahorrar y obtener energía en el futuro.

¿Cuál será la energía que ocuparemos en el trabajo?

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. La energía de las olas, o energía undimotriz, ha sido acogida como la más prometedora fuente de energía renovable para los países marítimos. No causa daño ambiental y es inagotable, las olas van y vienen eternamente.

1.4 Estructura de la tesis

El trabajo que se presenta a continuación se divide en cinco capítulos principales, además de una bibliografía.

En el Capítulo 1 se realiza una introducción al tema que vamos a tratar durante el desarrollo de este trabajo así como se mencionarán las principales fuentes alternas de generación eléctrica, además de proponer un objetivo y la justificación de la misma.

En el Capítulo 2 se realiza un estudio de la energía presente en el océano, sus manifestaciones y formas de obtención. Además, se estudia su aplicación en el caso de generación de energía eléctrica y los distintos métodos existentes.

En el Capítulo 3 se hace una revisión de los dispositivos básicos necesarios para llevar a cabo la conversión mecánica a eléctrica. Se detallan sus características de funcionamiento y se plantea un modelo del sistema de generación eléctrica. Se escoge además el tipo de generador más adecuado para un funcionamiento a velocidad variable.

En el Capítulo 4 se realiza la comparación con otros sistemas o modelos ya existentes, además de justificar la implementación del sistema propuesto en este trabajo, obteniendo de esto un modelo generalizado del sistema de generación eléctrico undimotriz.

Finalmente, en el Capítulo 5 son desarrolladas las conclusiones y recomendaciones respecto al trabajo.

Capítulo 2

La Energía Undimotriz

La energía de las olas, o energía undimotriz, ha sido acogida como la más prometedora fuente de energía renovable para los países marítimos. No causa daño ambiental y es inagotable las olas van y vienen eternamente.

La energía undimotriz es la energía producida por el movimiento de las olas; se trata de una energía todavía en desarrollo y en expansión. Escocia ha sido el lugar donde más se han desarrollado estos sistemas de generación de energía, por razones obvias: Potente infraestructura científica e industrial y fuerte oleaje.

Una de las propiedades características de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias sin grandes pérdidas 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.

2.1 El mar como fuente de energía

Uno de los temas referentes de la actualidad mundial durante los últimos años ha sido el mercado energético. La generación, distribución y consumo de energía son asuntos de suma importancia, económica y social, abarcando desde el entorno local hasta el mundial.

Es una evidencia contrastada la dependencia energética, y por tanto económica y social, de las fuentes de energía no renovables, sobre todo de los combustibles fósiles, y concretamente del petróleo. A su vez, contrastado por numerosos estudios, está el hecho de que los yacimientos de combustibles fósiles son cada vez más escasos y que a medio plazo se agotarán. Esto ha provocado que durante los últimos años el precio de la energía se haya disparado siguiendo la

estela del barril de petróleo, como se muestra en la figura 2.1, que es la principal fuente de energía a nivel mundial.



Figura 2.1 Precios del barril de petróleo.

España puede ser un ejemplo de este problema. Según un informe del Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (IDAE) sobre energías renovables (IDAE, 2005) España tuvo en 2004 un déficit energético de aproximadamente 17,500 millones de euros, esto corresponde con el 29% del déficit total de la economía española y un 2.2% del PIB. Esto sucedió a finales del año 2004 en un escenario con precios del petróleo en torno a \$50dls. El escenario actual y también para un futuro cercano, es aún menos halagador si se observan los datos de la Figura 2.1 y la Figura 2.2.



Figura 2.2 Evolución y previsión del consumo energético mundial (expresada en British Thermal Unit).

Está científicamente probado que el modelo actual daña al medioambiente a causa de las emisiones de gases a la atmosfera. El deterioro del medioambiente se ha convertido durante los últimos años en una importante preocupación social. Alcanzó su punto álgido en el año 1997 en la ciudad de Kyoto, donde se firmó el protocolo de Kyoto. Este tratado, corroborado por la mayor parte de los estados del mundo (a excepción de sonadas negativas como la de EEUU), establece una serie de restricciones de las emisiones a la atmosfera. Dichas restricciones cuestionan la continuidad del modelo energético actual.

Por estas dos razones, conseguir una mayor independencia energética de los combustibles fósiles y la preservación del medioambiente, se ha realizado una fuerte apuesta a nivel mundial por desarrollar las energías renovables.

La variedad y eficiencia de sistemas de obtención de energía renovables es amplia. Cada región planetaria trata de aprovechar los recursos disponibles gracias a su clima o situación geográfica. Las tecnologías utilizadas para la obtención de energía limpia son seis principalmente: hidráulica, biomasa, oceánica, eólica, solar y geotérmica. Sin embargo, la suma de todas estas tecnologías es un porcentaje pequeño respecto del total de energía consumido a nivel mundial, lo cual se ilustra en la figura 2.3.

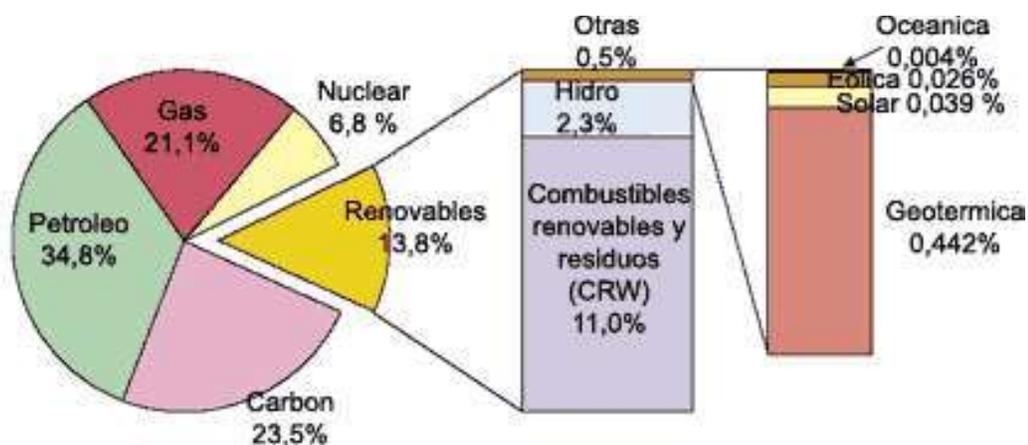


Figura 2.3 Generación de energía en el mundo (IDAE).

Dentro de la Unión Europea en general y de España en particular, destaca la ausencia total de los océanos como fuente de energía alternativa a pesar de ser un país eminentemente costero. Sin embargo, el mar alberga una enorme cantidad de energía que se manifiesta de diferentes formas: corrientes marinas, gradientes térmicos, mareas y oleaje. El mar, aunque en términos energéticos es territorio inexplorado, tiene sin lugar a dudas un enorme potencial.

El gran muro contra el que choca la extracción de energía de los océanos es el costo actual de la tecnología necesaria. Sin embargo, durante los últimos años, son muchos los grupos de investigación que se han introducido en el campo de la energía oceánica, lo que ha contribuido a un desarrollo importante de la tecnología. Gracias a esto se han registrado grandes avances que han acercado la energía oceánica a la viabilidad comercial.

Esta tesis se enmarca dentro de una de esas formas de energía marina: el oleaje, esta energía se denomina energía undimotriz y se considera una prometedora fuente de energía renovable para los países costeros. Las olas se forman en cualquier punto del mar por la acción del viento y descargan su energía sobre los obstáculos que encuentran en su camino. Los efectos de estos choques son enormes y la cantidad de energía disipada en ellos es considerable.

La potencia en una ola es proporcional al período y al cuadrado de la amplitud. Una ola de 2 metros de amplitud y un período de unos 8 segundos transporta una potencia de unos 50 KW por metro de longitud. Esta cantidad de energía es muy importante y hace que los países costeros tengan a su disposición una importante fuente energética. Si a esto se le añade que las emisiones contaminantes generadas por extracción de energía de las olas son nulas, el resultado es que las olas son una fuente de energía renovable de enorme potencial.

En la figura 2.4 muestra un esquema de la distribución a nivel mundial de la potencia undimotriz. Zonas como la costa atlántica europea, el sur de Oceanía o Suramérica disponen de costas en las que el nivel energético del oleaje es grande.

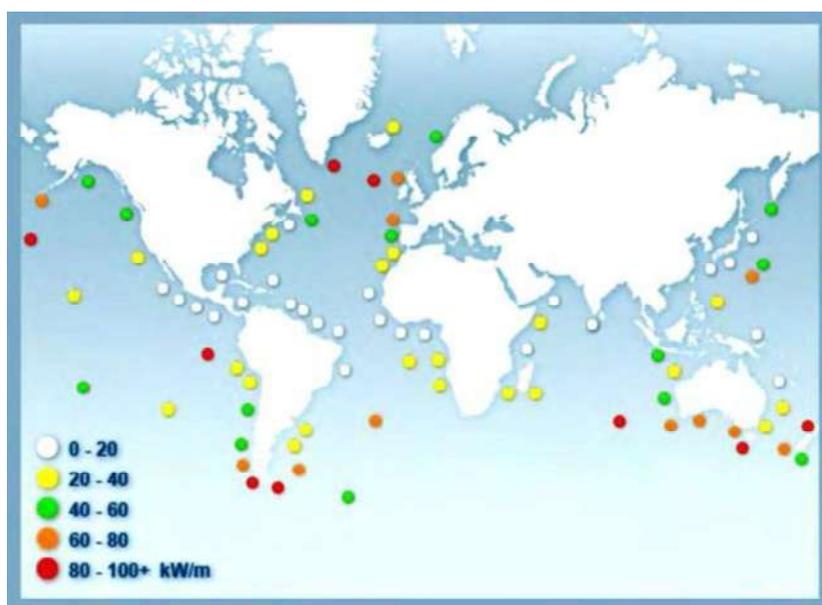


Figura 2.4 Potencia de las olas en el mundo.

El Consejo Mundial de Energía WEC (World Energy Council por sus siglas en inglés) ha estimado que el potencial energético de las olas a nivel mundial es aproximadamente de 2000 GW. A nivel europeo la energía undimotriz disponible es de unos 320 GW. El potencial es tan grande que la contribución al mercado de la electricidad de este tipo de energía se ha estimado que podría estar en torno a 2,000 TWh/año, lo que supone el 10% del consumo eléctrico mundial.

El potencial energético de los océanos comenzó a ser foco de interés después del incremento de precio del petróleo en la crisis de 1973. A partir de esa época muchos países comienzan a realizar mediciones en sus aguas e inician programas de investigación con el fin de conocer la viabilidad real de la energía undimotriz.

En torno a 1985 la Comisión Europea comienza a percibir la energía undimotriz como una posibilidad realmente viable y empieza a sentirse un creciente interés en diversos ámbitos científicos.

En 1993 la Comisión Europea decide financiar programas con el fin de desarrollar la energía undimotriz como fuente de energía alternativa. Comienzan, bajo el paraguas de la Comisión, los primeros encuentros europeos sobre energía undimotriz (Edimburgo 1993, Lisboa 1995, Patras 1998 y Aalborg 2000). Estos encuentros estimulan aún más las actividades desarrolladas por universidades y centros de investigación. Países como Dinamarca, Irlanda, Noruega o Inglaterra comienzan a financiar estudios cuyo propósito final es conseguir la viabilidad económica de la energía undimotriz. Paralelamente, la Comisión da comienzo a sus propios programas de investigación en 1994. En 1996 el estudio Atlas of Wave Energy Resource in Europe sienta las bases sobre las que crecerán diferentes iniciativas relacionadas con la energía undimotriz.

2.2 Energía undimotriz en el mundo

Europa es uno de los máximos exponentes de la apuesta por las energías renovables. A raíz del protocolo de Kyoto, en Europa se elaboró el Libro Blanco para una estrategia y plan de acción comunitario. En este documento, Europa asumía el reto de reducir sus emisiones de efecto invernadero mediante un cambio en el modelo energético. El objetivo es conseguir que el 12% de la energía consumida en Europa en el año 2010 sea de origen renovable. Este porcentaje crece a

más largo plazo, para el año 2020 el objetivo es lograr un 22% de energía de naturaleza renovable.

Lograr los objetivos fijados requiere un gran esfuerzo en el desarrollo de nuevas fuentes de energía alternativas. Durante los últimos años las inversiones en investigación y desarrollo en campos relacionados con la energía limpia han aumentado considerablemente, y esto ha desembocado en una sustancial mejora de las tecnologías existentes y la aparición de otras nuevas.

En España aún no se aprovecha este tipo de energía de forma comercial. En Cantabria y el País Vasco se están desarrollando proyectos de centrales piloto que utilizan la fuerza de las olas en Santoña y en Mutriku.

Diversos prototipos se están probando ya en varias partes del país, con el objetivo de que en unos años la fuerza del oleaje sea una energía renovable más. En otros lugares del mundo, como Portugal, Noruega o Escocia, se lo están tomando en serio y ya cuentan con diversas instalaciones. No obstante, todavía se trata de una tecnología que necesita un mayor desarrollo para ser competitiva. Santoña (Cantabria) y Pasajes (Guipúzcoa) eran testigos de la ubicación de sendos prototipos de tecnología undimotriz. Se trata de una boya, situada frente a la costa, que aprovecha el movimiento vertical producido por el oleaje para generar energía. La boya cuenta con una bomba hidráulica que traslada la energía mecánica obtenida a un alternador, cuya corriente puede ser luego transmitida a tierra mediante un cable submarino.

La boya ubicada frente a la costa cántabra es capaz de generar una potencia de 40kW, si bien la idea es probar su funcionamiento para poderle añadir más adelante otras nueve. De esta manera, se podría disponer de una planta con capacidad de 1,400kW anuales, la electricidad equivalente al consumo doméstico de unos 2,500 hogares.

Por su parte, el prototipo de Pasajes está realizado a escala 1:4 para estudiar durante varios meses su rendimiento y posibles impactos en el entorno. Si los resultados son positivos, sus promotores pretenden instalar un dispositivo a tamaño real con una potencia de 500kW. La instalación forma parte del proyecto Oceantec, que cuenta con un presupuesto de cuatro millones y medio de euros.

En Galicia prueban otro tipo de tecnología, conocida como “Pelamis”. El nombre, que significa serpiente marina, hace honor a su aspecto. El sistema consiste en una serie de cilindros articulados y parcialmente sumergidos. La ola induce un movimiento relativo entre los cilindros,

lo que activa un sistema hidráulico, y posteriormente, un generador eléctrico. Esta estructura prioriza la resistencia sobre la eficiencia en la conversión energética, ya que está pensada para zonas con condiciones marinas muy adversas. Se estima que 30 de estos sistemas podrían cubrir las necesidades energéticas de unos 20,000 hogares europeos.

En el nuevo dique del puerto de Mutriku, también en Guipúzcoa, pondrán en marcha una “columna de agua oscilante”. Este dispositivo, que cuesta 6.1 millones de euros, es una especie de chimenea ubicada en el lecho marino. Las olas entran por una apertura, y cuando el nivel del agua sube y baja, el aire es forzado a pasar por una turbina que gira e impulsa un generador.

En el puerto de Granadilla (Tenerife) también se tiene previsto poner a prueba una planta de energía undimotriz. El proyecto cuenta con un presupuesto de 400,000 euros, financiado principalmente por la Unión Europea y el Cabildo tinerfeño.

Movimientos similares acontecen en otros continentes donde países como Australia y Japón también comienzan a realizar estudios y financiar proyectos relacionados con la energía undimotriz.

Pero, al igual que muchas otras fuentes de energía en sus comienzos, la extracción de la energía de las olas tiene diversos problemas que hay que resolver o tratar de minimizar:

- La irregularidad de la amplitud, período, fase y dirección de las olas son el principal problema. Es difícil idear un sistema de extracción que opere con una eficiencia aceptable en todo tipo de condiciones.
- La frecuencia del oleaje es muy baja, además de ser variable. Esto complica el sistema de transformación y en consecuencia la obtención de energía eléctrica.
- La irregularidad de las condiciones del mar hace que los dispositivos puedan verse sometidos a condiciones que no puedan soportar mecánicamente.
- Fuertes tormentas, huracanes y otros fenómenos meteorológicos son problemas importantes.
- El costo de las instalaciones es alto. Tanto su creación como su mantenimiento (sobre todo en instalaciones en mar abierto) hacen que el costo del KWh generado no sea competitivo actualmente.

A pesar de las dificultades, durante los últimos años se han estudiado numerosos dispositivos para lograr un aprovechamiento económicamente viable, y algunos de ellos han alcanzado etapas muy cercanas a la comercial.

2.3 Energía undimotriz en México

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) voltea los ojos hacia el mar y apuesta a generar electricidad a base de oleaje, concretamente en Rosarito, Baja California, a 30 kilómetros 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 750 kilowatts.

La inversión requerida sería de 5.4 millones de dólares y tentativamente entraría en operación en enero de 2010. Más aún, la dirección de CFE argumenta: “Si los resultados son los esperados, se efectuará el paso de la instalación piloto a una comercial”.

A nivel mundial la información de este tipo de centrales de generación con oleaje es escasa. A la fecha, indican los especialistas de la paraestatal, sólo se ha construido la central de The Port Kembla en la costa oeste de Australia, cuya operación data de 2005, aunque el organismo estadounidense Electric Power Research Institute predice que la energía generada por oleaje con la tecnología como la que se pretende usar en Rosarito será la de menor costo.

De acuerdo con los estudios iniciados por CFE, la tecnología de Oceanlinx Ltd. emplea una columna de agua oscilante (OWC) que actúa como un sopladero artificial similar a los sopladeros naturales de las costas rocosas, como la famosa Bufadora, ubicada al sur de Ensenada; utiliza una estructura flotante para convertir la energía de las olas en electricidad.

La mayoría de tecnologías de energía de oleaje disponibles en el mundo sólo pueden ser instaladas en profundidades de 50 metros o más, y la tecnología OWC de Oceanlinx Ltd. puede situarse como estructura flotante en profundidades de 30 m, permitiendo ubicaciones más cercanas a la costa, lo que resulta en un costo más bajo para la instalación del cable eléctrico necesario hacia la costa, así como la logística para su construcción, operación y mantenimiento.

En este caso, el contorno de 30 m de profundidad está cercano de la costa (dos kilómetros) al extremo sur de la ciudad; el cable llegará a la costa en un sitio situado a 100 metros al sur del muelle del hotel Rosarito, donde puede correr a lo largo del borde del lecho seco del Arroyo Rosarito en zona federal, hasta una subestación de interconexión de la CFE. El proyecto, por

tanto, consiste en una estructura flotante de acero que se mueve verticalmente acorde con las olas y está restringida dentro de un corredor estrecho por líneas de amarre catenarias. La única “huella” que tiene esta estructura en el ambiente local son las anclas que la amarran al lecho marino y el cable eléctrico que corre de regreso a la costa a lo largo del lecho marino.

La CFE asegura que, desde el punto de vista ambientalista, al menos los niveles de ruido del dispositivo son muy bajos y que Lloyds Register lo ha certificado.

Lloyds Register verificó que no hay un componente tonal del ruido (no hay frecuencia dominante). Mientras que la turbina está instalada muy por encima del nivel del agua y, por lo tanto, cualquier emisión de ruido de la turbina es fuertemente silenciada en el océano (y todavía más atenuadas por el mismo océano); la falta de un componente tonal indica que los niveles de ruido que se oyen en el agua no se ajustan a la frecuencia de ninguna vida marina.

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 mega watts para generar 16 mil giga watts-hora por año.

2.4 Obtención de la energía undimotriz

Las olas son ondas que se desplazan por la superficie de los mares y océanos, son puestas en marcha por el viento, y representan el principal agente modelador de las costas. Su altura y período son funciones de la velocidad del viento, la duración y la lejanía de las aguas sobre las cuales este sopla.

Hay ciertos tipos de olas llamadas catastróficas, las cuales son resultado de condiciones no usuales, tales como tormentas intensas sobre o cerca del océano, las que generan las denominadas marejadas. También están las olas producidas por terremotos y/o derrumbes submarinos denominados tsunamis. Estas olas generalmente producen daños y pérdidas de vidas.

A través del tiempo, el ser humano ha interactuado intensamente con el océano, ya sea para el aprovechamiento de sus recursos biológicos y minerales, o bien para su utilización con fines recreativos. El agua cubre más del 70% de la superficie total del planeta, destacando los océanos Pacífico, Atlántico, Índico y Ártico. El océano Pacífico es el más grande y profundo, seguido del

océano Atlántico, el cuál presenta mares adyacentes, entre los cuales se encuentran los mares Mediterráneo, Báltico, Ártico, del Caribe y del golfo de México.

Algunos sistemas experimentales y que se encuentran en pruebas en el mundo se describen a continuación.

2.4.1 Pelamis

El convertidor de energía de las olas Pelamis es un ejemplo de tecnología emergente que usa el movimiento del oleaje oceánico, para crear electricidad. Es un ejemplo práctico de generador undimotriz.

La primera granja o parque de olas, llamada Okeanós, está planificada para la costa portuguesa cerca de la ciudad de Póvoa de Varzim. Los parques usarán elementos P-750 con una potencia unitaria de 750 KW y cada parque sumará aproximadamente 2.25 MW. El parque experimental evitará la emisión de más de 6,000 toneladas de dióxido carbono que de otra manera serían producidos por la producción de electricidad a partir de fuentes fósiles.

El día 23 de septiembre de 2008 se inauguró la primera fase de este parque de olas, y se conectó a la red eléctrica.

Lamentablemente el día 17 de marzo de 2009 se publicaba que debido a dificultades técnicas y financieras el proyecto se cerraba. Las dificultades técnicas han sido fundamentalmente que el mantenimiento es más difícil de lo planificado. Las financieras han sido que la actual crisis económica ha afectado a una de las empresas del consorcio.

Las primeras 12 secciones serán fabricadas en las instalaciones de Arnish en la Isla de Lewis en Escocia por la compañía Camcal y las siguientes se fabricarán en Portugal.

2.4.1.1 Principio Básico

El sistema Pelamis de obtención de energía está diseñado 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 solo 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.

2.4.1.2 Funcionamiento

El sistema Pelamis consiste en una serie de secciones cilíndricas parcialmente sumergidas, unidas por juntas bisagra, como se muestra en la figura 2.5.



Figura 2.5 Fotografía real del Pelamis.

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 30 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 transporta mediante un sólo cable a una base situada en el lecho oceánico (Figura 2.6). Varios elementos se pueden interconectar a

una misma base para unir su potencia de generación y trasladar la energía producida mediante un solo cable submarino hacia la costa.

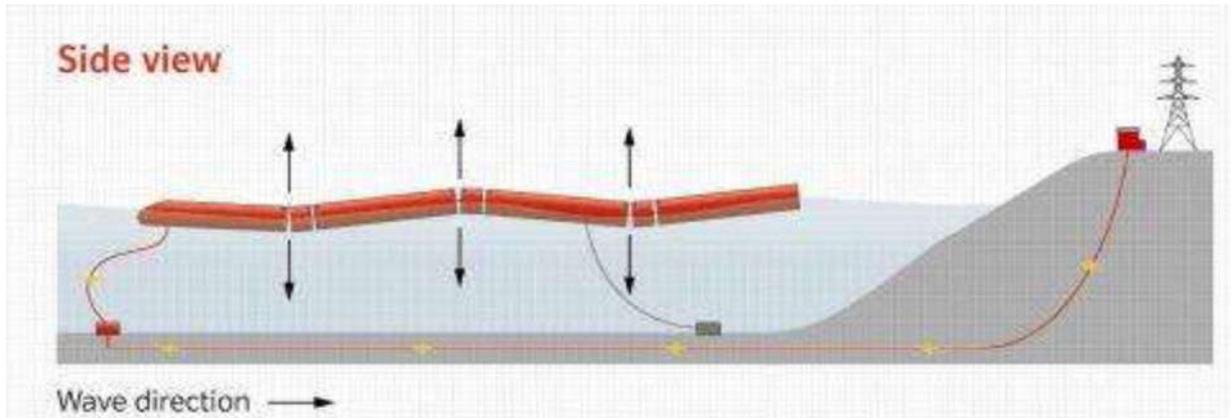


Figura 2.6 Transmisión de la energía eléctrica a la costa.

2.4.2 Columpio de olas Arquímedes

El Columpio de olas de Arquímedes (Archimedes Wave Swing, AWS) genera electricidad de la energía generada por la marejada marina. Su funcionamiento consiste en una boya de forma cilíndrica amarrada al lecho marino. Con el paso de las olas se mueve una carcasa superior llena de aire contra un cilindro inferior fijo, imprimiendo un movimiento vertical que se transforma en electricidad, lo cual se ilustra en la figura 2.7.

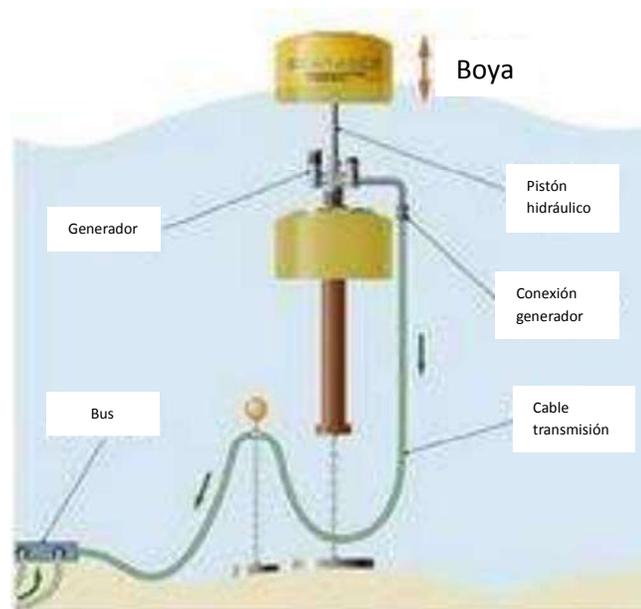


Figura 2.7 Configuración del columpio de Arquímedes.

2.4.2.1 Principio Básico

Al acercarse la cresta de la ola se incrementa la presión del agua sobre el cilindro, y la parte superior (o flotador) comprime el gas que hay dentro del cilindro para equilibrar las presiones. Al pasar la ola y expandirse el cilindro ocurre exactamente lo contrario. El movimiento relativo entre el flotador y la parte inferior del silo se transforma en electricidad mediante un sistema hidráulico y un conjunto motor-generator.

El dispositivo es simple, y sólo tiene una pieza móvil: el flotador. Sus sistemas auxiliares son limitados y se han diseñado para ofrecer un alto nivel de fiabilidad por medio de redundancias duales y del uso de componentes industriales y submarinos de probada eficacia.

2.4.2.2 Requisitos para su instalación

El columpio de Arquímedes o AWS es un generador de alta potencia destinado a la producción de electricidad para una red pública. Las ubicaciones en las cuales se debe instalar han de cumplir los siguientes requisitos específicos:

- Deben estar expuestas al mar de fondo: costa occidental de las Islas Británicas, Irlanda, Francia, España, algunas zonas de México o Portugal.
- Deben tener entre 40 y 100 m de profundidad de agua y estar alejadas de las principales rutas comerciales marítimas.
- Deben contar con una red eléctrica segura en costa.
- Deben tener un puerto industrial a un máximo de 12 horas de navegación.
- El lecho marino debe ser adecuado para tender cableado eléctrico hasta la costa.
- La captura energética por máquina dependerá de la energía del oleaje incidente en la ubicación, y tenderá a ser mayor en latitudes templadas (40° – 60° norte o sur).

2.4.2.3 Ventajas del sistema

El sistema AWS ha sido objeto de importantes estudios de terceras partes en los que se han identificado varias ventajas significativas respecto a otras tecnologías de aprovechamiento de la energía de las olas, a saber:

Durabilidad: El sistema AWS está sumergido un mínimo de 6 metros bajo la superficie marina, y por tanto evita las elevadas cargas derivadas de las tormentas que otros dispositivos deben soportar. Esto reduce los costes de anclaje y los riesgos de daños.

Densidad energética: Dado que en el futuro producirá hasta 1 MW y tendrá factores de carga en torno al 25-30%, el dispositivo AWS es una opción real para las empresas eléctricas públicas que busquen desarrollos de varios MW. Su densidad energética es 10 veces mayor que la de los dispositivos flotantes.

Simplicidad: el sistema AWS tiene una única pieza móvil y un número limitado de elementos auxiliares.

Mantenimiento: el sistema AWS está diseñado para que todas las piezas que necesiten mantenimiento resulten accesibles a vehículos por control remoto, lo que permite realizar el mantenimiento sea cual sea el estado del mar.

Ecología: Otra ventaja de este sistema sumergido es que no tiene impacto visual.

Economía: El sistema AWS presenta una relación de energía producida por kilogramo de acero empleado más elevado que el sus principales competidores.

2.4.2.4 Actual aplicación

Se cuenta con desplegar las máquinas AWS en grupos de varias decenas de unidades alineadas. Una planta de 50 MW ocupará una superficie de unas 3 millas náuticas de largo y 2 cables de ancho (el cable es una unidad náutica que es equivalente a 200 yardas o 600 pies). Si una yarda son aproximadamente 1.1 metros, podemos decir que el ancho de esa planta serian 440 metros más o menos como se muestra en la figura 2.8, y generará electricidad suficiente para 25,000 hogares.



Figura 2.8 Aplicación real del columpio de olas de Arquímedes.

El concepto de absorción energética fue probado a gran escala en 2004 por medio de una planta piloto instalada en las proximidades de la costa portuguesa. En la actualidad se está desarrollando un proyecto de ingeniería detallado para crear un sistema de demostración pre comercial optimizado de 250 KW.

2.4.3 Dragón de las olas

Dragón de las olas (Wave Dragon en inglés) es un sistema de conversión de energía undimotriz, el primero que funciona en alta mar. Es esencialmente un dispositivo que eleva las olas marinas a un embalse por encima del nivel del mar, donde se permite que el agua pase por una serie de turbinas y por lo tanto se genere electricidad.

2.4.3.1 Tecnología

Es un convertidor energético flotante, que funciona anclado al fondo del mar convirtiendo la energía potencial del agua que alcanza su balsa central en energía eléctrica. Puede ser instalado individualmente o en cadena con hasta varios cientos de estructuras similares, lo que resultaría en una planta con una capacidad similar a la alcanzada por una planta de fuel o carbón tradicional.

El primer prototipo conectado a la red está actualmente instalado en Nissum Bredning, Dinamarca. Se están llevando a cabo pruebas de desempeño a largo plazo, para determinar la potencia y disponibilidad de energía bajo diferentes condiciones marítimas. Se ha comprobado, por un centro independiente, la capacidad publicitada por el grupo investigador, y los esfuerzos se centran a partir de 2006 en la optimización de la producción energética. Estas pruebas conducirán a la instalación de una planta múltiple en 2007.

El concepto del dragón de olas combina tecnologías marítimas y de hidroturbinas ya existentes y maduras, de una forma nueva y original. Esta es la única tecnología de su clase que puede escalar fácilmente. Debido a su tamaño, las tareas de mantenimiento y reparo pueden llevarse a cabo en el lugar de producción, lo que abarata los costos en comparación con otras alternativas.

2.4.3.2 Principio de funcionamiento

La idea básica del dragón de olas es usar principios bien estudiados en otros sistemas hidroeléctricos, pero en el contexto de una plataforma flotante. El mecanismo es muy sencillo: una barrera captura el agua de las olas que sobrepasan un cierto nivel y la almacena en un estanque flotante (Figura 2.9). Al pasar por unas turbinas hidroeléctricas, su energía potencial se convierte en energía eléctrica, completando el ciclo de tres fases (absorción, almacenamiento y conversión).



Figura 2.9 Wave Dragon en operación.

Con frecuencia, los convertidores de energía undimotriz utilizan bien el movimiento o las diferencias de presión producidas por las olas del mar, y existen numerosas técnicas para conseguirlo (columnas oscilantes de aire/agua, palas giratorias, etc.). El dragón de olas no usa ningún mecanismo intermedio, sino que simplemente captura la energía potencial del agua elevada de forma natural. La construcción es muy simple, este mecanismo sólo tiene una parte móvil: las turbinas. Esta característica es esencial en cualquier sistema diseñado para funcionar en alta mar, a merced del oleaje y las tempestades.

Sin embargo, el dragón de olas tiene un muy complejo diseño conseguido tras un gran esfuerzo investigador, que ha conseguido:

- Optimizar el llenado del estanque interno.
- Reducir la tensión en las barreras de desvío del oleaje y en el sistema de anclaje.
- Limitar el costo de construcción, mantenimiento y funcionamiento.
- En definitiva, producir cuanta energía eléctrica sea posible al mínimo coste, de un modo ecológico y confiable.

2.4.4 Columna Oscilante de Agua

La Columna de Agua Oscilante (Oscillating Water Column u OWC) genera electricidad en un proceso de dos pasos. Cuando la ola entra en la columna, fuerza al aire de la columna a pasar por la turbina e incrementa la presión dentro de la columna. Cuando la ola sale, el aire vuelve a pasar por la turbina, debido a la disminución de la presión de aire en el lado del océano de la turbina (Figura 2.10). Sin importar la dirección de la corriente de aire, la turbina (conocida como turbina Wells, como su inventor) gira hacia la misma dirección y hace que el generador produzca electricidad.

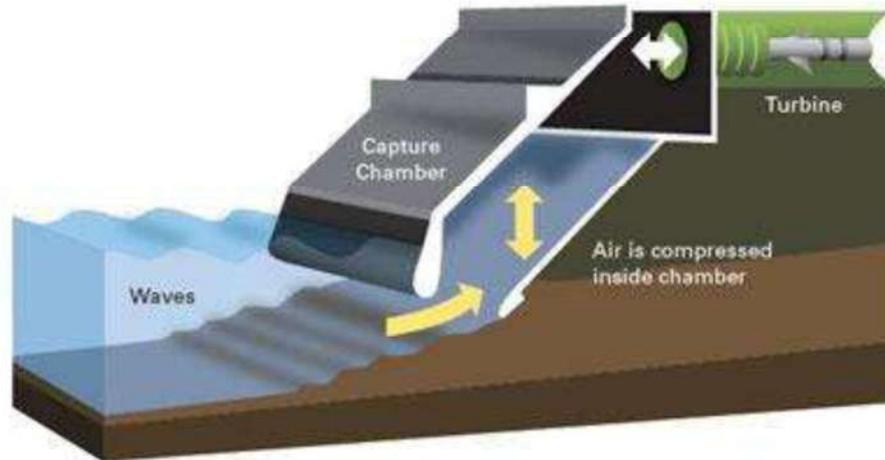


Figura 2.10 Columna Oscilante de Agua.

2.4.4.1 Actuales aplicaciones

La tecnología OWC se está utilizando en la isla de Islay en Escocia, donde hay un sistema instalado desde el año 2000 llamado LIMPET. Este sistema tiene una producción máxima de 500 KW. Es ideal para lugares donde existe una fuerte energía de olas, como en los rompe olas, defensas costeras, proyectos de recuperación de territorio y escolleras de puertos. En la isla de Islay, la electricidad generada se está utilizando para hacer funcionar un bus eléctrico, el primer bus en el mundo que utiliza energía de las olas como combustible.

El rendimiento ha sido mejorado para un promedio anual de intensidad de olas entre 15 y 25 KW/m. La columna de agua alimenta a un par de turbinas de contra rotación, y cada una de ellas opera a un generador de 250 KW, produciendo un rango de 500 KW. El diseño de LIMPET es fácil de construir e instalar, además de generar pocas obstrucciones y ser poco visible, por lo que no genera molestias en el paisaje costero.

Investigadores del MIT, uno de los centros más importantes del mundo en desarrollo tecnológico están trabajando en equipo con científicos portugueses para elaborar un proyecto piloto que consiga capturar la energía de la fuerza del océano para generar electricidad a través de una turbina.

Los lugares más propicios para el aprovechamiento de esta renovable son las costas noroestes de Estados Unidos, la costa oeste de Escocia, el sur de Suramérica, África y Australia. Aquí podría conseguirse producir de 0 a 200 MW por km de costa. Pero no es fácil diseñar un sistema que pueda soportar el salitre y los cambios en la fuerza de las olas, así como las mareas y las tormentas.

El plan portugués es integrar la columna oscilante de agua en la desembocadura del río Duero. Serían concretamente tres instalaciones diferentes que generarían juntas 750 KW, suficiente para proporcionar energía a 750 viviendas.

2.4.5 Dispositivos Tecnológico OPT

El sistema de la generación undimotriz de Ocean Power Technologies (OPT) utiliza "una boya discreta" de alta mar para capturar y para convertir energía de la onda en una fuerza mecánica controlada que conduzca un generador eléctrico, tal como se muestra en la figura 2.11.



Figura 2.11 Sistema undimotriz con boya.

En Santoña (Cantabria) se encuentra una de las pocas plantas generadoras de energía undimotriz.

Es un proyecto innovador, el primero de Europa, que la empresa Iberdrola Renovables ubicará en aguas de Cantabria por las condiciones idóneas de su mar y por la inexistencia de problemas derivados del tráfico marítimo en el lugar elegido, frente al Faro del Pescador de Santoña. La planta contará con un total de 10 boyas que producirán una potencia de 1.5 MW. La tecnología de esta energía se basa en el aprovechamiento de la oscilación de las olas (de uno a cinco metros) mediante una boya, anclada al suelo, a la que van incorporados unos motores que se deslizan por el mástil y que transforman el movimiento provocado por las olas en energía eléctrica.

La central eléctrica se compone de boyas múltiples de transmisión subacuática cablegráfica. Una central eléctrica del OPT 10-Megawatt ocuparía solamente aproximadamente 4 acres (16,187m²) de espacio del océano.

El sistema de la generación de la onda de PowerBuoy™ del OPT utiliza “una boya discreta” de alta mar para capturar y para convertir energía de la onda en una fuerza mecánica controlada que conduzca un generador eléctrico.

El levantamiento y el caer de las ondas de orilla hacen la boya moverse libremente hacia arriba y hacia abajo, como se muestra en la figura 2.12.

El rozamiento mecánico resultante que se produce en el interior de la boya activa el generador eléctrico.

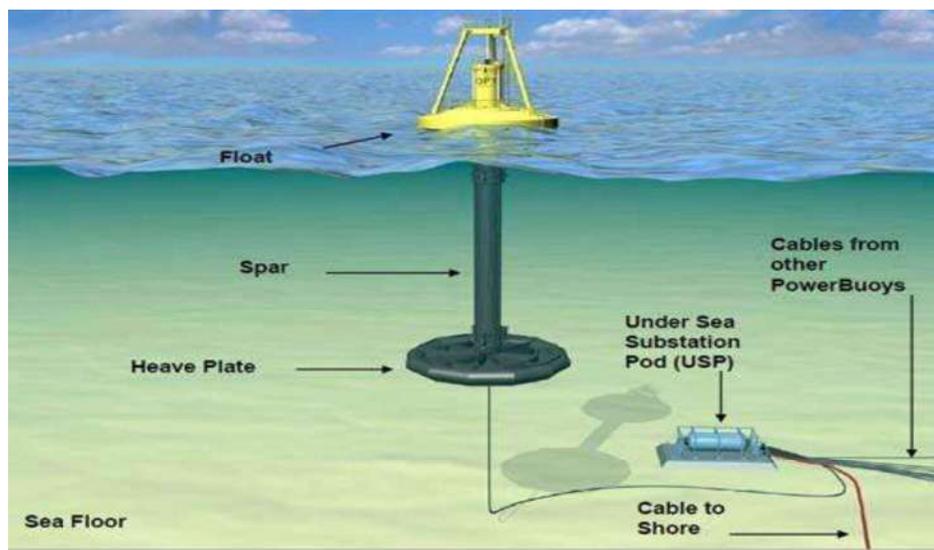


Figura 2.12 Configuración de la PowerBuoy.

La corriente alterna generada se convierte en la C.C. del alto voltaje y se transmite en tierra vía un cable de transmisión subacuático. El PowerBuoy™ se realiza con los sensores que supervisan continuamente el funcionamiento de los varios subsistemas y del ambiente circundante del océano. En el acontecimiento de ondas próximas muy grandes, el sistema desconecta automáticamente. Cuando las alturas de onda vuelven al normal, el sistema vuelve a conectar y recomienza la conversión y la transmisión de la energía.

Algunas de las ventajas del uso de este sistema son:

- Los gastos de explotación totales de generar energía de una central eléctrica de onda del OPT se proyectan para ser solamente (los E.E.U.U.) 3-4¢/KWh para los sistemas de 100MW y de 7-10¢/KWh para las plantas 1MW, incluyendo gastos del mantenimiento y de explotación, así como el coste de capital amortizado del equipo.
- Instalación simple.
- El costo es altamente competitivo contra fuentes convencionales de la energía.
- Comparable a las centrales eléctricas de la alta capacidad (100MW+).
- La energía puede ser vertida inmediatamente en la red de energía o ser almacenada.

2.5 Ventajas y desventajas de la energía undimotriz

Uno de los principales problemas técnicos consiste en cómo absorber la energía mecánica, que se presenta con un campo de velocidades aleatorio, en energía eléctrica apta para su conexión a la red eléctrica.

El alto costo económico de la inversión inicial da lugar a que estas centrales tengan un periodo de amortización largo. Por otra parte, su utilización se circunscribe a zonas costeras o próximas a la costa, por el costo económico que supone transportar la energía obtenida a lugares del interior.

Las ventajas y las desventajas de la energía undimotriz se describen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de la energía undimotriz.

Ventajas	Desventajas
Auto renovable	Ligero impacto visual sobre el paisaje costero
No contaminante	Localización puntual
Forma arrecifes coralinos mejorando fauna y flora	Dependiente de la amplitud de las olas
Sin costo de materia prima, almacenable y versátil	Posible ruido que podría minimizarse
No desplaza población	
Disponible en cualquier clima y época del año	
No produce gases de “cambio climático”	

Como principales ventajas se tiene que:

Hay que resaltar que la forma de generación y transmisión del recurso de olas es, en sí, mucho más estable en el tiempo que el viento. Se trata de un recurso concentrado, predecible, cercano a grandes consumidores y de alta disponibilidad.

- Las olas pueden desplazarse durante largas distancias sin perder energía.
- Es un recurso predecible si se conocen, entre otros factores, el viento en alta mar y las tormentas, gracias a su propiedad de propagación a lo largo de cientos de kilómetros sin que se degrade su energía (los tiempos de propagación son de 2-3 días). Este factor es fundamental para integrar los parques de olas en la red eléctrica. Además, debido a la naturaleza dispersiva del oleaje, cuya principal consecuencia es que las olas de distinta frecuencia llegan a las costas en distintos instantes, el control resulta más sencillo.
- Es un recurso cercano a grandes consumidores.

- Ofrece alta disponibilidad ya que es un recurso abundante y con flujos de energía elevados.
- Las instalaciones petrolíferas marinas ofrecen información y experiencia, pese a que las plataformas marinas se diseñan para oponer la mínima resistencia al oleaje, y el anclaje de los dispositivos que nos ocupan debe ser tal que la resistencia al oleaje sea máxima. De hecho, los costos de amarre y anclaje pueden alcanzar la mitad de los costos totales.
- Algunos dispositivos permiten el uso de generadores síncronos, que participarían en el control de la potencia reactiva de la red.
- El desarrollo de esta energía dará seguridad de suministro energético a regiones remotas, igual que ocurre con otras energías renovables.
- Puede amortiguar el oleaje en zonas portuarias o erosionables.
- Se impulsará la diversificación de empleo y estimulará industrias en declive como las de construcción de barcos.
- Es una energía limpia, no emite gases contaminantes a la atmósfera.
- Permite usos alternativos a la energía eléctrica de la energía obtenida, como la producción de hidrógeno o la obtención de agua potable del mar.

Ventajas de la energía undimotriz en comparación con la energía eólica:

- La energía cinética de las olas (es función de la altura de la ola al cuadrado) es 1000 veces superior a la del viento (es función al cubo de la velocidad del aire), lo que permite utilizar aparatos más pequeños para producir la misma cantidad de energía.
- Es un recurso energético concentrado puesto que es mucho mayor la densidad del agua que la del aire. La densidad del agua salada (la densidad del agua típica del mar, agua salada con un 3,5% de sales disueltas es $\sim 1028 \text{ kg/m}^3$) es aproximadamente 800 veces la del aire ($\sim 1,3 \text{ kg/m}^3$).
- El impacto visual es mucho menor que el de los aerogeneradores (figura 2.13); además, los dispositivos pueden estar situados bajo la superficie del mar, en rompeolas o alejados de la costa.
- La energía de las olas es más continua que la eólica, que muere por la noche, durante la mañana y con atmósferas inversas (temperaturas extremas), y que la energía solar. La energía de las olas varía en las estaciones del año del mismo modo en que varía la demanda de electricidad en zonas con climas templados.

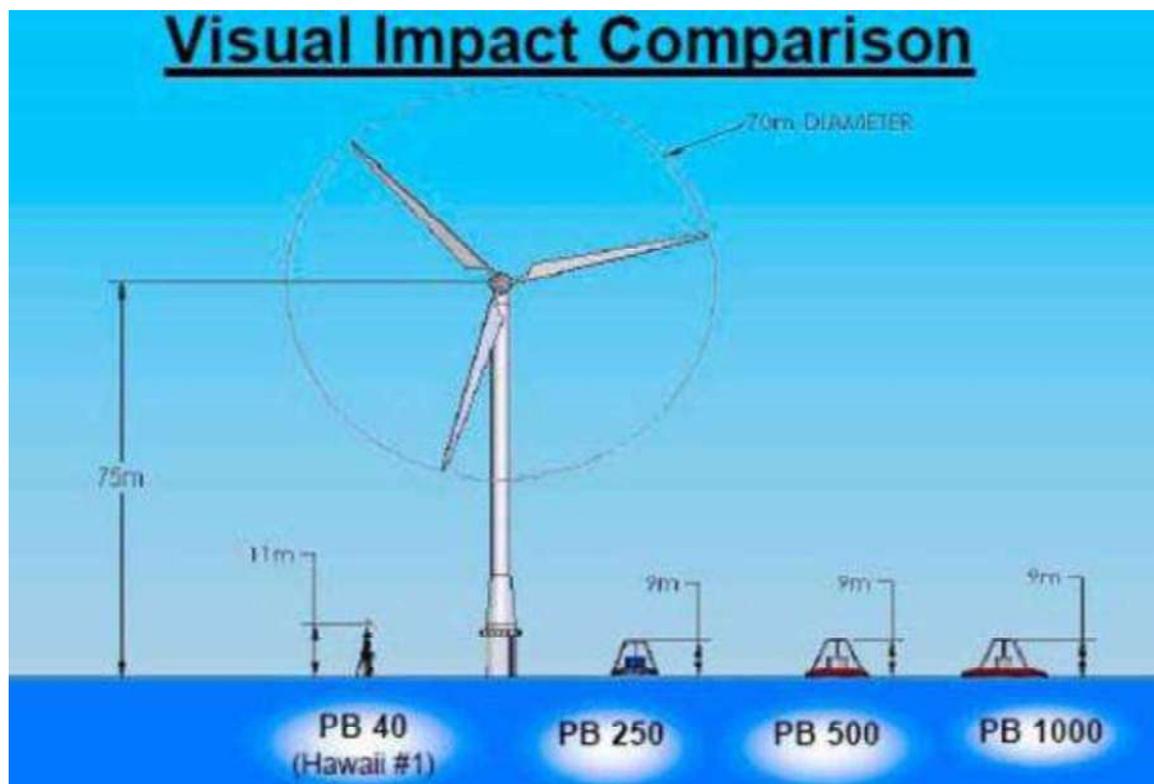


Figura 2.13 Comparación de impacto visual.

Mientras que las principales desventajas de la energía undimotriz son:

- Varios dispositivos han fracasado ante tormentas, ya que la carga que debe soportar el dispositivo en las condiciones más adversas (p. ej. huracanes) puede ser 100 veces mayor que su carga nominal. Asimismo, aunque las condiciones sean mejores, los dispositivos tienen que soportar la energía cinética de las olas ininterrumpidamente.
- Los dispositivos alejados de la costa tienen unos costes importantes, debidos no sólo al mantenimiento y a la instalación, sino también al sistema de amarre, que debe ser revisado y sustituido cada poco tiempo, garantizando que ninguna pieza se pierda y quede a la deriva.
- La vegetación marina crece en todo lo que se instala en el mar.
- El efecto corrosivo del agua salada tiene consecuencias muy negativas en distintos materiales. Por ejemplo, provoca que el acero se oxide, que el cobre se disuelva y que el aluminio desaparezca.
- El diseño es complejo. Como afirma Creus Solé [Creus Solé, 2004]: "lo que se diseña en la bañera no funciona en el mar".
- La irregularidad en la amplitud, en la fase y en la dirección de la ola (la potencia entrante es aleatoria) hace difícil que un dispositivo obtenga el máximo rendimiento en todo el intervalo de frecuencias de excitación.

- Es complicado acoplar el movimiento lento ($-0,1$ Hz de frecuencia) e irregular de la ola al del generador, que normalmente trabaja a una frecuencia 600 veces mayor.
- En general, la eficiencia de la conversión energética no es alta.
- El coste de la planta de conversión es muy alto. Pese a que el coste de la materia prima es nulo (no hay que olvidar que el fluido de trabajo es el agua o el aire), el coste de construcción, que implica los sistemas de anclaje, los cierres herméticos, los cojinetes, etc., es muy elevado. De momento no es competitivo con el coste de ninguna central convencional.

El aprovechamiento de la energía de las olas tiene un impacto ambiental considerable. En este apartado se presenta la mayor paradoja de este aprovechamiento energético: es una forma de fomentar el desarrollo sostenible destruyendo ecosistemas.

Entre los impactos ambientales que produce se pueden destacar:

- La alteración del clima marítimo (sedimentos, ecosistemas).
- La emisión de ruido.
- El impacto visual y estructural sobre el paisaje.
- Los efectos negativos en la flora y la fauna, que pueden afectar a las aves migratorias y a los peces.
- Los efectos en la reproducción de algunas especies.
- Los efectos en la sedimentación en las costas y en las playas.
- Los riesgos para la navegación.

Todas estas características parecen manifestar que el diseño de un dispositivo de energía undimotriz debe ser, desde el punto de vista de aprovechamiento energético, sofisticado y fiable y, por otro lado, económicamente viable; aunque como citaba el autor de *Energy from Waves*, David Michael Ross: "la energía de las olas no fue diseñada para ahorrar dinero, sino para salvar el mundo".

Capítulo 3

Modelado de una Unidad de Generación

3.1 Distribución de la energía de las olas

En la figura 3.1 muestra un esquema de la distribución a nivel mundial de la potencia undimotriz. Zonas como la costa atlántica europea, el sur de Oceanía o Suramérica disponen de costas en las que el nivel energético del oleaje es grande.

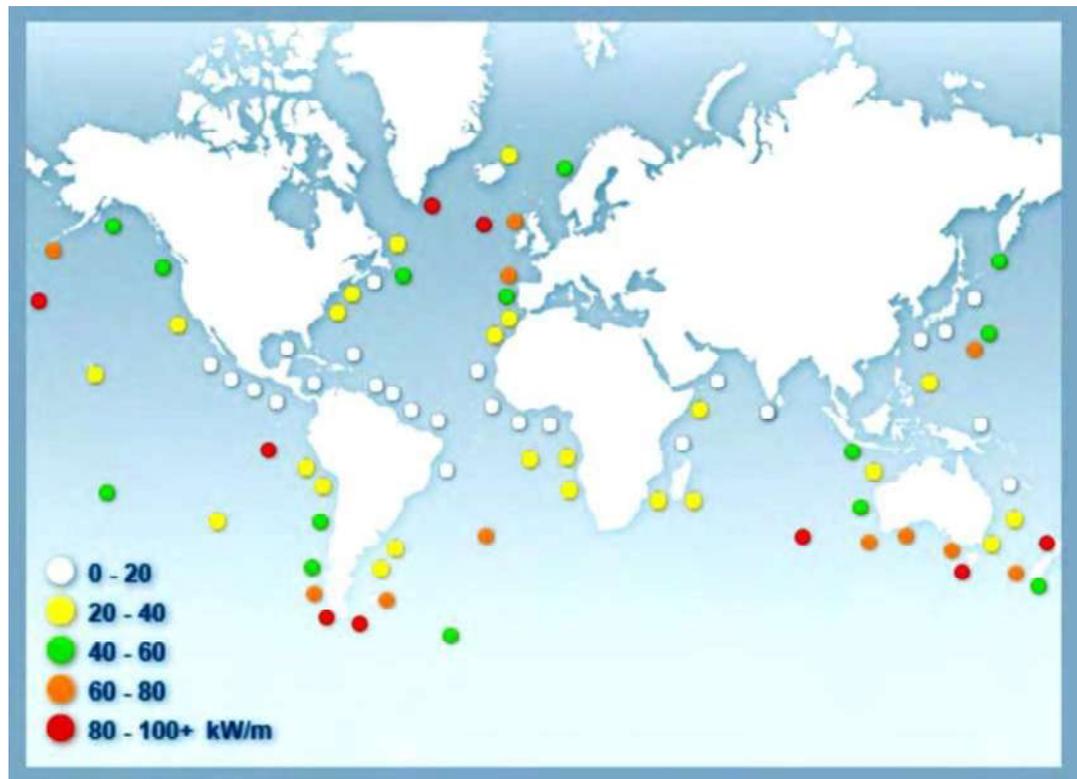


Figura 3.1 Potencia de las olas en el mundo.

Para el caso particular de México, uno de los mejores lugares en los que se tiene mayor potencia de la energía de las olas, es en las costas de Rosarito, Baja California, México.

Existen diversas formas de definir el oleaje según las características que presente. Un ejemplo sería la clasificación general siguiente donde se destacan dos grandes grupos:

- Las **ondas estacionarias**; aquellas que tienen unos puntos nodales donde el movimiento es nulo y otros ventrales donde el desplazamiento es máximo o mínimo.
- Las **ondas transitorias o progresivas**; aquellas que varían en el tiempo y en el espacio.

La intensidad y el grado de desarrollo que tenga el oleaje dependerán principalmente de los siguientes factores:

- La **intensidad** o fuerza con la que sopla el viento.
- El **tiempo** que sopla el viento en una misma dirección.
- El **fetch** o distancia a lo largo de la cual el viento sopla en la misma dirección.

3.2 Comportamiento del oleaje real

En teoría lineal se consideraba que el oleaje era un tren de olas regular sinusoidal, sin embargo, la realidad dista mucho de ésta idealización. El oleaje real es una superposición de trenes de olas de diferentes valores de periodo y altura que dan como resultado registros complejos de la superficie libre, como se muestra en la figura 3.2.

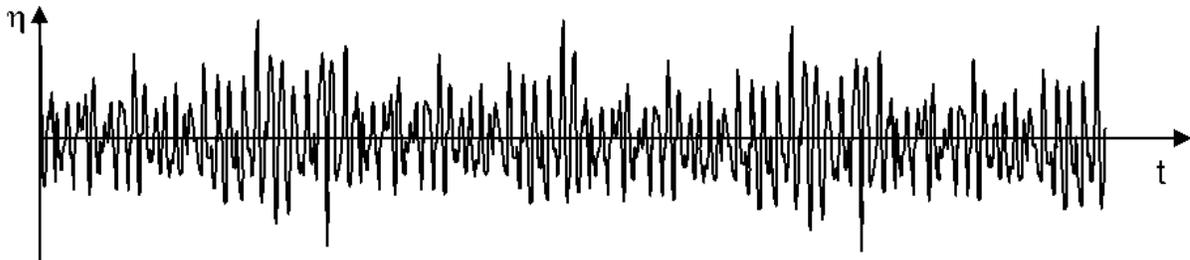


Figura 3.2 Muestra real del comportamiento de las olas.

El oleaje real se estudia con dos técnicas distintas: mediante una descripción estadística de los parámetros o bien mediante el uso de una función de densidad espectral.

Si partimos de un ejemplo de registro oleaje de tiempo limitado (20 minutos para estados de mar), se obtienen N alturas de ola H_i con T_i periodos asociados. Cada altura H_i será la máxima variación de la superficie libre entre dos pasos por cero ascendentes y T_i el tiempo transcurrido

entre dichos puntos como se muestra en la figura 3.3. Una vez se tienen estos datos, el oleaje vendrá caracterizado por un sólo valor de altura de ola y periodo que defina el estado de mar.

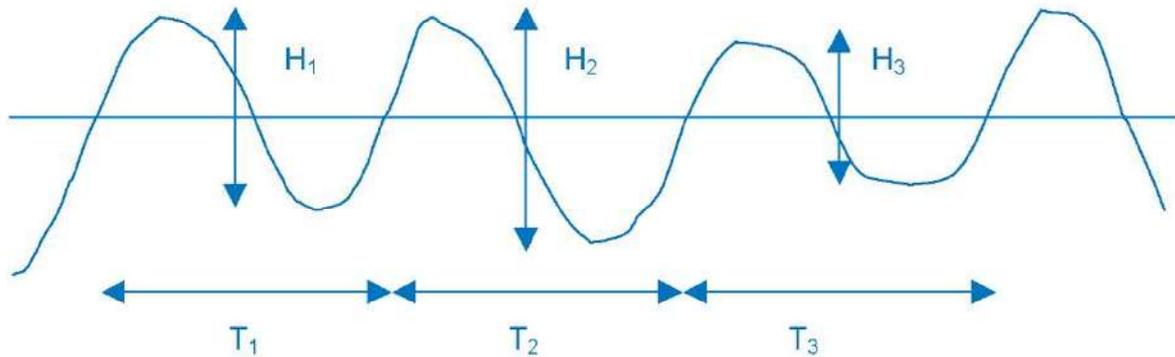


Figura 3.3 Muestra de un tren de olas real.

La superficie del mar es una superposición compleja de frecuencias de oleajes con periodos, alturas de ola y direcciones diferentes, como se aprecia en la figura 3.4. Se puede interpretar como la superposición de muchas ondas monocromáticas de diversas amplitudes, periodos, direcciones y fases.

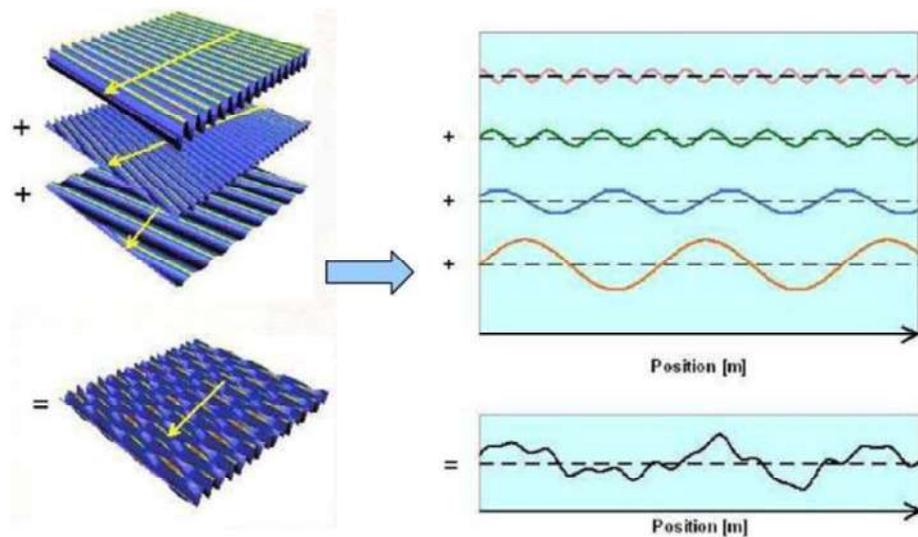


Figura 3.4 Representación gráfica de olas.

El oleaje actúa como un acumulador de energía en el sentido de que es capaz de recibir energía, transportarla de un lugar a otro y almacenarla. Como la densidad del aire es mucho menor que la del agua, en la superficie libre las partículas tienen más libertad para la traslación. A causa de

esto, las olas se propagan a miles de kilómetros por la superficie del mar pero no hacia el fondo. Además, poseen la capacidad de desplazarse durante grandes distancias con pérdidas de energía mínimas y, por esta razón, la energía generada en cualquier parte de océano termina en el borde continental, de modo que la energía de las olas se concentra en las costas.

A pesar de que las pérdidas son mínimas, la densidad energética de oleaje decrece cerca de las costas debido a la interacción de las olas con el lecho marino, sin embargo, esta disipación de energía puede ser compensada por fenómenos naturales como la reflexión o refracción, que originan las llamadas concentraciones de energía. En relación con estos fenómenos, Creus Solé define los coeficientes de reflexión cuando la ola chaca con un obstáculo vertical, una barrera, por ejemplo, y se refleja con muy poca pérdida de energía, de difracción cuando representa la energía del oleaje a sotavento de una barrera y de refracción que es el cambio de dirección que sufre una ola al acercarse a una zona de menor profundidad, como puede ser una playa por ejemplo.

En la figura 3.5 se representan las distintas energías de las olas: la energía cinética de las partículas del agua, que en general siguen caminos circulares, y la energía potencial de las partículas elevadas.

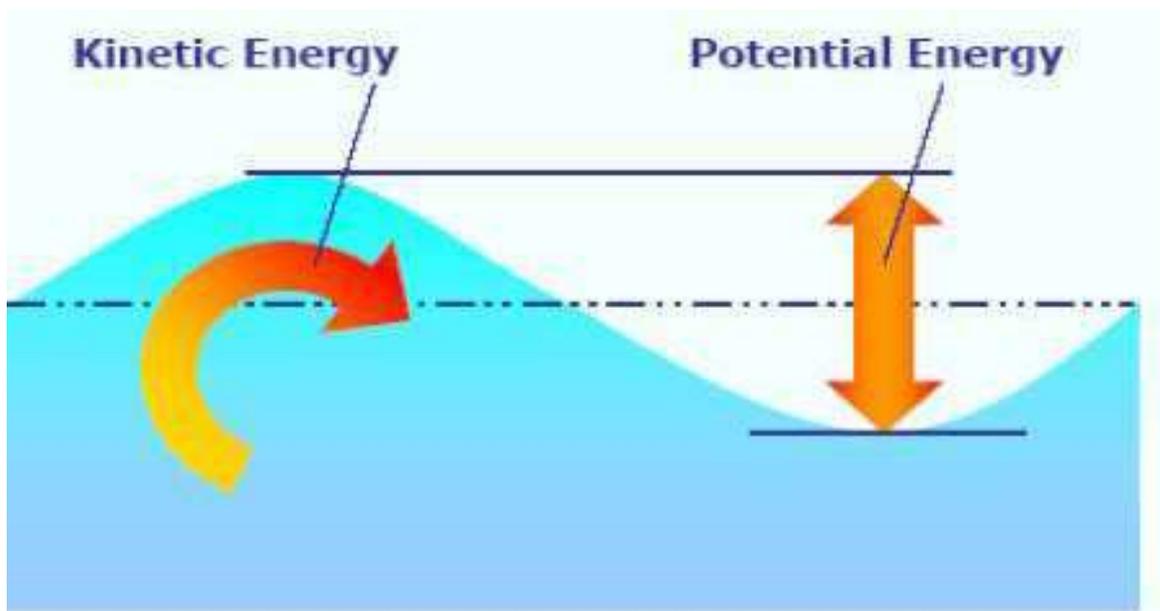


Figura 3.5 Energías presentes en las olas.

3.3 Cantidad de energía eléctrica en las olas

La capacidad de oleaje de generar energía se mide con los parámetros de energía, flujo de energía y potencia por metro de frente de ola (KW/m).

Hay muchos estudios que proporcionan modelos del comportamiento de las olas considerando la zona en la que se propagan, pero, debido a su complejidad, sólo se van a describir superficialmente los parámetros que definen las olas cortas, cuya longitud de onda es considerablemente inferior a la profundidad del mar donde se desplazan.

Las olas cortas son las olas normales producidas por el viento. Un conjunto de olas cortas, con distintos valores de altura, periodo y dirección, forman una ola real.

Los parámetros que caracterizan una ola corta son:

- Longitud de onda (λ): Que es la distancia que separa 2 crestas consecutivas, en profundidades indefinidas, la longitud de onda se define como

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3.1)$$

- Periodo de la ola (T): tiempo entre dos crestas o dos valles sucesivos, definido por

$$T = \frac{2\pi}{w} \quad (3.2)$$

- Celeridad de la ola: velocidad de traslación de la ola o velocidad de fase, definido por

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (3.3)$$

- Celeridad de grupo

$$C_g = \frac{C}{2} \quad (3.4)$$

- Peso específico del agua del mar: $\rho = 1028 \text{ kg/m}^3$
- Altura de la ola (H): distancia entre la cresta y el valle.

La potencia de las olas depende del cuadrado de la altura de la ola o, lo que es lo mismo, de la velocidad de viento, y del periodo o frecuencia de movimiento. La siguiente fórmula es la expresión de la potencia por metro de frente de ola. Sobra decir que, cuanto mayor sea la velocidad del viento incidente, mayor será el valor de energía de la potencia de ola.

$$\text{Flujo de energía (kw/m)} = \frac{\rho g H^2}{8} C_g \quad (3.5)$$

3.4 Energía eléctrica de las olas en México

De las diferentes zonas de costa con las que cuenta México, el mejor lugar en donde se tienen olas con la altura y periodo más grandes y aptos para el aprovechamiento de la energía undimotriz, se encuentra la costa de Rosarito Baja California, como anteriormente se mencionó en el capítulo 2, la Comisión Federan de Electricidad realizó un estudio en las diferentes costas del país, encontrando las de Baja California, las más aptas para la instalación de una planta piloto de obtención de energía undimotriz.

Por esta razón se toma como lugar de estudio esta misma costa, de donde, en una página para surfistas, se encuentran los siguientes datos de interés mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Comportamiento de las olas en la costa de Rosarito, Baja California. [Fuente: www.windguru.cz]

GFS 18.11.2010 18 UTC	Ju 18. 12h	Ju 18. 15h	Ju 18. 18h	Ju 18. 21h	Vie 19. 03h	Vie 19. 06h	Vie 19. 09h	Vie 19. 12h	Vie 19. 15h	Vie 19. 18h	Vie 19. 21h	Sa 20. 03h	Sa 20. 06h	Sa 20. 09h	Sa 20. 12h	Sa 20. 15h	Sa 20. 18h	Sa 20. 21h	Do 21. 03h	Do 21. 06h	Do 21. 09h	Do 21. 12h	Do 21. 15h	Do 21. 18h	Do 21. 21h	Lu 22. 03h	Lu 22. 06h
Velocidad viento (nudos)	5	7	6	2	3	0	3	6	8	6	6	8	8	12	16	14	11	9	6	5	2	2	6	5	3	6	6
Rachas viento (nudos)	5	7	6	3	3	1	4	6	9	7	8	10	11	15	20	20	17	13	7	7	5	5	8	7	4	8	9
Dirección viento	→	→	→	↓	→	↓	↗	↗	↗	↗	↗	↑	↑	↑	↑	↑	↗	→	↓	↓	↓	↗	→	→	↓	↓	↓
Ola (m)	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1	1	1	1	0.9	1.1	1.1	1.1	1.2	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.6	1.7
Periodo olas (seg.)	14	14	14	14	13	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	9	10	9	9	9	15	11	11	9	11	13	13
Dirección olas	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	→	→	↗	↗	→	→	→	→	→
*Temperatura (°C)	16	19	17	13	13	12	13	17	17	15	13	13	14	14	16	15	15	15	12	11	11	14	15	14	11	11	11
Nubosidad (%) alta / media / baja	-	-	-	-	36	61	94	98	68	61	47	20	11	5	23	51	13	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lluvia (mm/3h)	-	-	-	-	-	-	-	5	20	39	57	69	90	74	95	90	86	27	14	-	-	-	12	25	9	61	53

De donde podemos observar que, se encuentran los datos actuales y pronosticados para los días del 18 al 22 de noviembre del 2010, dentro de los cuales se encuentran los datos de nuestro interés, los cuales son la altura de las olas, así como el periodo de las mismas.

En base a estos datos, observamos que los periodos de las olas van desde los 9 hasta los 15 segundos, así como las alturas de las mismas, que varían desde los 0.9 hasta los 1.7 metros de altura.

Con estos dos datos máximos y mínimos, realizamos el cálculo de la potencia por frente de ola definida por la ecuación (3.5), teniendo como resultado lo siguiente:

Para los datos de la tabla 3.1, con altura de 0.9m con periodo de 12seg, se tiene:

Longitud de onda:

g es la aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2)

$$\lambda_{\min} = \frac{gT_{\min}^2}{2\pi} = \frac{(9.8)(12)^2}{2\pi} = 224.8286 \text{ m}$$

Celeridad:

$$C = \frac{\lambda}{T} \therefore \boxed{C_{\min} = 18.7357 \text{ m/s}}$$

Celeridad de grupo:

$$C_g = \frac{C}{2} \therefore \boxed{C_{g\min} = 9.3678 \text{ m/s}}$$

Flujo de Energía:

Peso específico del agua de mar : $\rho = 1028 \text{ Kg/m}^3$

$$FE = \frac{\rho g H^2}{8} C_g$$

$$FE_{\min} = \frac{(1028)(9.8)(0.9)^2}{8} (9.3678) = 9.56 \text{ kW/m}$$

Mientras que para los datos de la tabla 3.1, con altura de 1.7m con periodo de 13seg, se tiene que:

Longitud de onda:

g es la aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2)

$$\lambda_{\max} = \frac{gT_{\max}^2}{2\pi} = \frac{(9.8)(13)^2}{2\pi} = 263.8613 \text{ m}$$

Celeridad:

$$C = \frac{\lambda}{T} \therefore \boxed{C_{\max} = 20.297 \text{ m/s}}$$

Celeridad de grupo:

$$C_g = \frac{C}{2} \therefore \boxed{C_{g\max} = 10.1485 \text{ m/s}}$$

Flujo de Energía:

Peso específico del agua de mar : $\rho = 1028 \text{ Kg/m}^3$

$$FE = \frac{\rho g H^2}{8} C_g$$

$$FE_{\max} = \frac{(1028)(9.8)(1.7)^2}{8} (10.1485) = 36.97 \text{ kW/m}$$

En base a esto, podemos ver que, en una buena temporada se puede tener una energía de 37 kW/m, así como cuando se tienen las olas más bajas se tendrá una energía mínima de las mismas de aproximadamente 10 kW/m.

3.5 Características básicas del generador

Para la conversión mecánica – eléctrica, es decir, la fuerza que va a proporcionar el movimiento de las olas poderlo utilizar para generar energía eléctrica, es necesario definir las características básicas con las que debe de contar el generador eléctrico.

Para comenzar con esto, se sabe que la instalación de un generador undimotriz, por la naturaleza del lugar de donde se obtendrá la energía mecánica, es dentro del mar, por lo que es necesario que el generador a utilizar no ocupo otra fuente de energía más que la del mar, por ello se opta

por seleccionar un generador que sea asíncrono, ya que la naturaleza de la fuente de energía mecánica, es decir, las olas, no son constantes, por lo que mantener una velocidad constantes es prácticamente imposible, por tal motivo el generador asíncrono, por su construcción es capaz de generar a diferentes velocidades, comparado con el generador síncrono, además de esto, es necesario que sea de imanes permanentes, ya que por la misma ubicación sería difícil y caro hacer llegar la energía para excitar el generador para que pueda generar, por este motivo, se escoge uno de imanes permanentes, con lo cuál se soluciona el problema si fuera el caso de un generador completamente con devanados.

Dicho lo anterior, vemos que se va a necesitar que el generador tenga una capacidad máxima de generación de aproximadamente 37 kW, que sería cuando se tienen las mejores olas en cuanto a su periodo y altura.

Para esto se supone que las bobinas irían en el rotor y los imanes permanentes estarán estacionarios en el estator, así mismo, la velocidad síncrona de este generador será de 900 rpm, es decir, un generador de 8 polos.

Tomando como base la ley de inducción de Faraday, se obtiene el valor de las bobinas así como el voltaje inducido a partir de una intensidad de campo magnético proporcionado por los imanes.

En base a esto, primero debemos de saber cuál es la corriente de línea necesaria para generar la potencia deseada, esto lo obtenemos simplemente con la fórmula de potencia trifásica para máquinas eléctricas.

$$P = \sqrt{3}VI \cos(\phi) \quad (3.6)$$

Donde el $\cos(\phi)$ es el factor de potencia, siendo este del 80% en la mayoría de las máquinas eléctricas.

A partir de la ecuación (3.6), despejamos la corriente, ya que los demás valores los conocemos, los cuales son:

$$P = 37kW$$

$$V = 220V$$

$$\cos(\phi) = 0.8$$

En base a esto obtenemos una corriente necesaria de:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos(\phi)} = \frac{37kW}{\sqrt{3} * 220V * 0.8} = 121.3747 A$$

A partir de esta corriente podemos definir los parámetros básicos de un generador.

3.6 Diseño básico del generador

Para ejemplificar esta parte hacemos uso de las ecuaciones propuestas por la ley de inducción de Faraday, las cuales son:

Voltaje inducido

$$\begin{aligned}\varepsilon_L &= -N \frac{d\phi}{dt} \\ \varepsilon_L &= -L \frac{di}{dt}\end{aligned}\tag{3.7}$$

A partir de la cuál, tenemos que la inductancia es:

$$L = \frac{N\phi}{i}\tag{3.8}$$

En donde, N corresponde al número de vueltas de la bobina, ϕ el flujo magnético e i la corriente del inductor.

El flujo magnético y el voltaje inducido se calculan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\phi = BA\tag{3.9}$$

$$\varepsilon = NA|B|w\tag{3.10}$$

En donde, B es la intensidad del campo magnético, A es el área de la bobina, ε es el voltaje inducido y w es la velocidad síncrona en radianes por segundo.

Para la demostración del diseño propuesto de generador, suponemos que las bobinas de rotor son de forma rectangular de 50cm de largo por 10cm de ancho y cada una de ellas es de 100 vueltas, la intensidad de campo magnético (B), se toma de un valor de 0.5 teslas, este valor es tomado de la tabla 3.2 donde se muestran algunos de los materiales magnéticos, para este caso el isotrópico libre de cobalto cumple con la intensidad de campo requerida.

Tabla 3.2 Propiedades de alnicos fundidos comerciales.

Tipo	Nombre comercial	Composición porcentual (balance, Fe)					Propiedades magnéticas*		
		Al	Ni	Co	Cu	Otros	B_r , T	$(BH)_{max}$, kJ/m ³	H_c , kA/m
Isotrópico, libre de cobalto	Alni, Alnico III	12-14	24-26		0-4	0-1 Ti	0,5-0,6	10	57-40
Isotrópico, con cobalto	Alnico, Alnico 2, Reco	9-11	16-20	12	3-6	0-1 Ti	0,65-0,8	13-14	50-60
Isotrópico, alta H_c	Hynico, Alnico XII	8-10	18-21	17-20	2-4	4-8 Ti	0,6-0,7	14-16	72-60
Grano al azar, tratado en campo	Alcomax, Alnico V, Ticonal G	8-8,5	13-15	24	2-4	0-1 Ti 0-2 Nb	1,1-1,3	36-44	60-45
Grano al azar, tratado en campo, alta H_c	Hycomax, Alnico VIII, Ticonal X	7-8	14-15	34-40	3-4	4-8 Ti	0,75-0,90	40-48	160-110
Grano orientado, tratado en campo	Columnax, Alnico V-7	8-8,5	13-15	24	2-4	0-1 Nb	1,3-1,4	56-64	62-56
Grano orientado, tratado en campo, alta H_c	Columnar Hycomax, Ticonal XX, Alnico IX	7-8	14-16	34-40	3-4	4-6 Ti 0-1 Nb 0,3 S	1-1,1	50-75	140-110

Con los datos proporcionados anteriormente, y las ecuaciones anteriormente definidas de la ley de inducción de Faraday podemos decir entonces que:

El área de la bobina es de:

$$A = (0.5m)(0.1m) = 0.05m^2$$

El flujo magnético en base a la intensidad de 0.5 teslas definidos anteriormente será de:

$$\phi = BA = (0.5T)(0.05m^2) = 0.025Wb$$

Para obtener el valor de la inductancia, consideramos el número de vueltas de la bobina que es de 100, el flujo magnético que se obtuvo anteriormente y el valor de la corriente que se obtuvo en base a la ecuación 3.6, teniendo como resultado:

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{(100vueltas)(0.025Wb)}{121.3747A} = 20.5973mH$$

Con el valor de esta bobina se puede obtener la corriente inducida deseada en base a la intensidad de campo magnético que se definió anteriormente, así como considerando las dimensiones de la misma. Ahora sólo falta comprobar que el voltaje inducido sea similar el voltaje que se desea a la

salida del generador, es decir, que se tengan 220V de línea en las salidas del generador, para comprobar esto usamos la ecuación (3.10), pero antes de esto, obtenemos la velocidad síncrona de nuestro generados de la siguiente forma:

$$w = \eta = \frac{120f}{\text{polos}} = \frac{120(60\text{Hz})}{8\text{polos}} = 900\text{rpm} = 15\text{rps} = 94.2477 \text{ rad/seg}$$

Una vez obtenida la velocidad síncrona de nuestro generador, calculamos el voltaje inducido con la ecuación (3.10):

$$\varepsilon = NA|B|w = (100\text{vueltas})(0.05\text{m}^2)(0.5\text{T})(94.24 \text{ rad/seg}) = 235.61\text{V}$$

De esta forma podemos decir que:

Con un campo magnético de 0.5 teslas de intensidad sobre una bobina de 20.6 mili henrios, en donde la bobina gire a una velocidad de 900 rpm dentro del campo magnético, se podrá tener una generación máxima de potencia de alrededor de 37kW.

Una propuesta del diseño del generador se muestra con un poco más de detalle en las siguientes figuras:

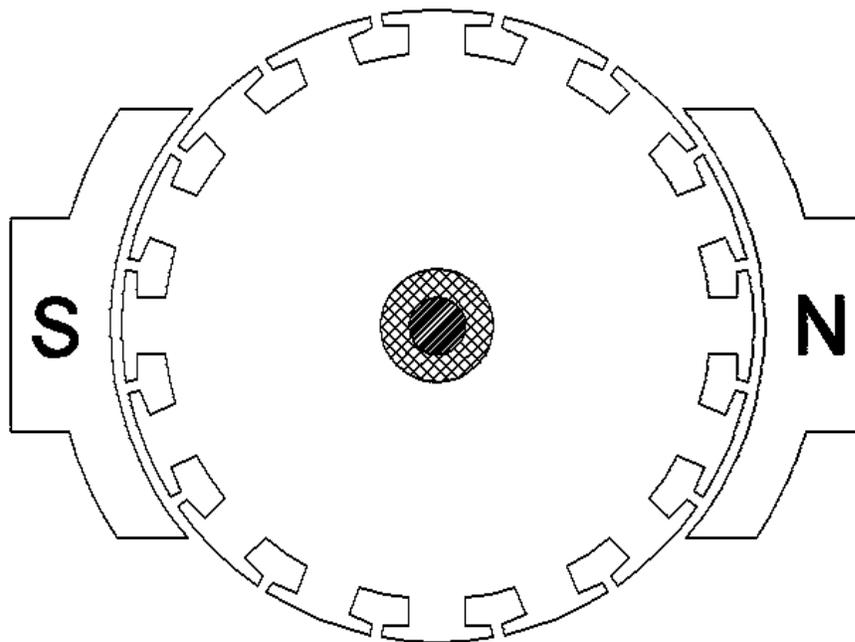


Figura 3.6 Rotor devanado con imanes permanentes.

En la figura 3.6 podemos apreciar el rotor del generador propuesto en este trabajo, el cuál deberá tener 24 ranuras las cuales dan lugar a 8 polos, los cuales son propuestos en para tener una velocidad síncrona de generación de 900 rpm, además, de forma representativa se muestra la posición de los imanes permanentes con los que cuenta este generador.

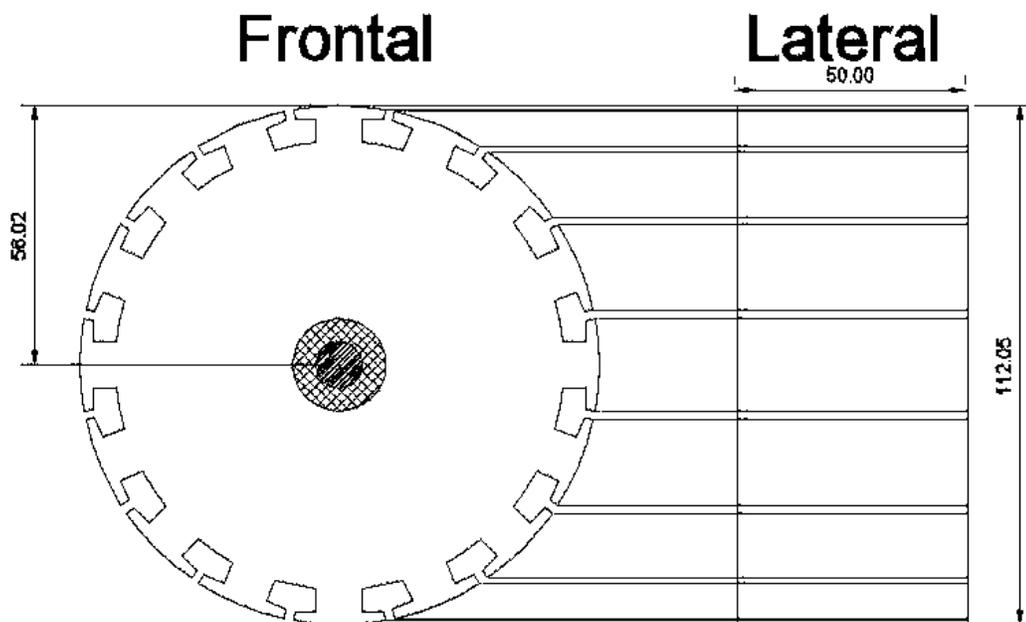


Figura 3.7 Vista frontal y lateral del rotor.

En la figura 3.7, se puede apreciar que las medidas mínimas requeridas del rotor son de 56.02cm de radio (vista frontal), los cuales hacen un diámetro de 112.05cm de diámetro total del rotor, en cuanto a lo largo del rotor se muestra que es de 50cm (vista lateral).

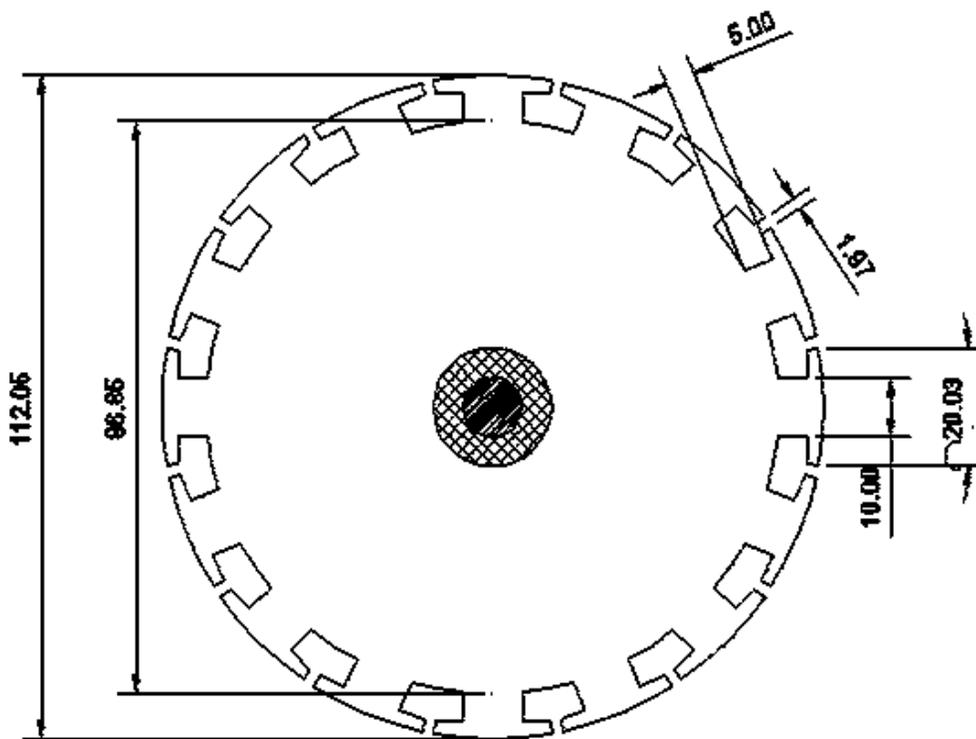


Figura 3.8 Dimensiones del rotor.

En la figura 3.8 se muestran más a detalle las dimensiones del rotor, dentro de las cuales tenemos un diámetro interior de 96.85cm, un diámetro exterior de 112.05cm, además tenemos una

profundidad de las ranuras de 5cm, un hueco entre las caras polares de 1.97cm, 20.03cm de la cara polar y 10cm que serían el ancho de la bobina.

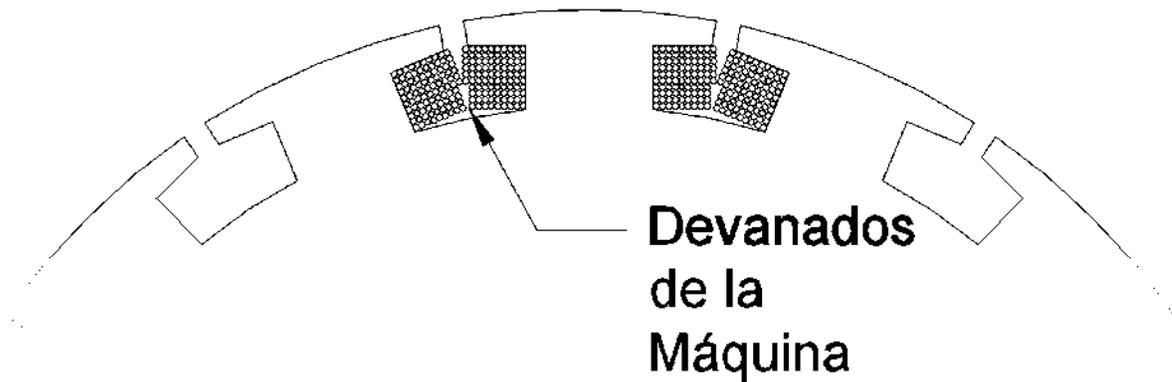


Figura 3.9 Devanados en las ranuras del rotor.

Por último, en la figura 3.9 se muestran las bobinas dentro de las ranuras del rotor.

3.7 Comportamiento del generador a diferentes velocidades

Tomando como referencia los valores obtenidos anteriormente, podemos establecer un comportamiento a diferentes velocidades de generación hasta llegar a la velocidad síncrona de nuestro generador, en la gráfica de la figura 3.10 se muestra el comportamiento del voltaje y la corriente a diferentes velocidades.

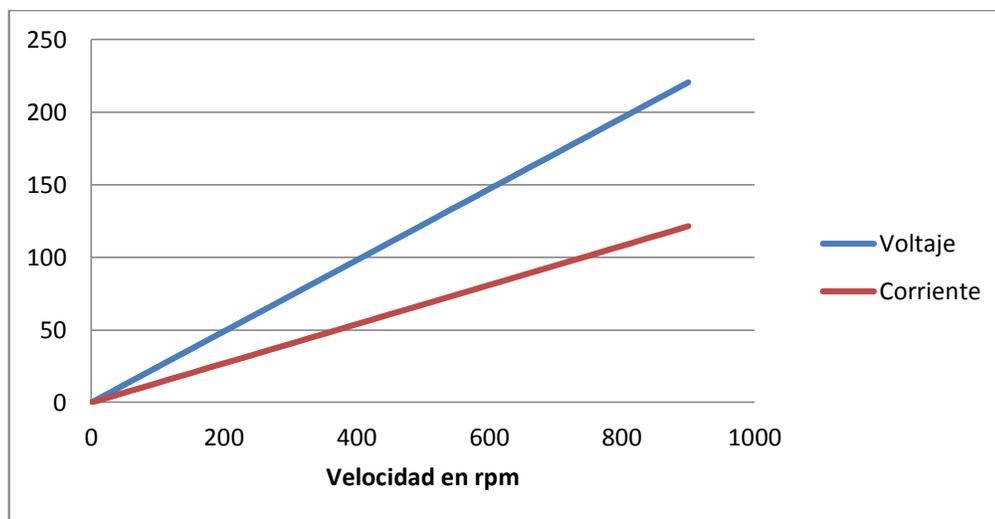


Figura 3.10 Voltaje y corriente respecto a la velocidad.

De igual forma, podemos ver también cuál es el comportamiento de la potencia, pero para este caso, se muestra la potencia de salida del generador, es decir, que para la gráfica de la figura 3.11 se toma en cuenta la ecuación (3.10), esto es con el fin de mostrar la potencia trifásica de salida del generador incluyendo su factor de potencia.

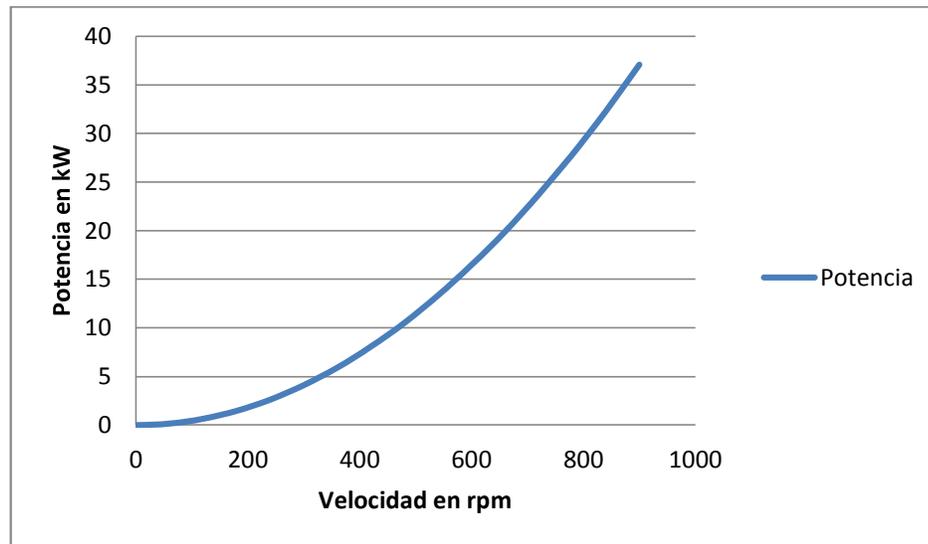


Figura 3.11 Potencia de salida a diferentes velocidades.

Capítulo 4

Modelado de un Sistema de Generación

4.1 Introducción

La energía eléctrica tiene una gran importancia en el desarrollo de la sociedad, su uso hace posible la automatización de la producción que aumenta la productividad y mejora las condiciones de vida del hombre.

Es necesario ahorrar electricidad, porque ahorrando ésta, se ahorra petróleo y divisas que se pueden invertir en otras ramas de la economía, la educación, la investigación o la cultura. Nuestro país no sólo se preocupa por la situación que tiene el petróleo en el planeta, sino porque somos un país subdesarrollado y aunque tenemos yacimientos de este recurso, los niveles de extracción aún no satisfacen el consumo nacional, por ello nos vemos en la necesidad de invertir gran cantidad de divisa para comprarlo.

Es por ello que se toman las medidas para su ahorro, ya que las termoeléctricas constituyen nuestra principal fuente de energía eléctrica, al aumentar la demanda eléctrica hay que aumentar la capacidad de generación de las centrales eléctricas, es por eso que la cooperación de cada ciudadano evitando el malgasto es indispensable para eliminar esta situación. Para lograrlo es necesaria la eficiencia en el ahorro energético, tanto en las industrias como en el hogar.

La generación de energía de las olas no es una tecnología comercial empleada mucho actualmente aunque ha habido intentos de usarla desde, al menos, 1890.

Se han diseñado varios dispositivos para convertir la energía de las olas en electricidad. La maquinaria necesaria para convertir el lento movimiento de las olas en electricidad es costosa y por ello la energía de las olas realmente aprovechable en la actualidad es pequeño y el coste de la electricidad generada con estos sistemas, muy superior al de la producida con fuentes energéticas convencionales.

En realidad, la energía que se obtiene del movimiento de las olas marítimas es un derivado indirecto de la energía solar, ya que el aumento de la incidencia del sol en la tierra provoca el calentamiento global, la superficie terrestre aumenta su temperatura y esto provoca viento, que a su vez es el responsable del oleaje. Este tipo de energía renovable se aprovecha porque su principal característica es que las olas se desplazan a grandes distancias sin apenas pérdida de energía, y por tanto, la que se genera en el océano acaba llegando al litoral, donde se puede recoger y transformar para el uso humano.

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.

El objetivo de lograr una tecnología capaz de extraer energía del oleaje no es nuevo. Las primeras patentes fueron registradas en París, en tiempos de la Revolución Francesa, por un padre e hijo de apellido Girard. Sin embargo, el verdadero desarrollo de esta tecnología no comienza hasta el último cuarto del siglo XX.

En este sentido, los expertos enumeran hasta 81 prototipos diferentes, algunos de los cuales ya se utilizan en distintas partes del mundo. Sin ir más lejos, Portugal es uno de los países que quiere tomar la delantera. En cualquier caso, se considera a Noruega y Escocia pioneras de la tecnología undimotriz.

Las instalaciones undimotrices requieren una alta inversión y un mayor desarrollo tecnológico. Sus responsables deben mejorar en varias cuestiones, como su eficiencia al aprovechar el movimiento no lineal y esquivo de las olas, o su resistencia al embate de las mismas, y todo ello con un coste asumible.

4.2 Selección del tipo de OWC de generación

Este tipo de instalaciones todavía no es competitivo pero las posibilidades de contar con una energía limpia más no se pueden menospreciar. La tecnología undimotriz presenta incluso más ventajas que otras renovables: se trata de una energía constante y predecible, ya que siempre hay olas, y su impacto en el entorno también es menor.

En base a los diferentes sistemas de generación de este tipo anteriormente mencionados en este trabajo, se recomienda de La Columna de Agua Oscilante (Oscillating Water Column u OWC), ya que respecto a las otras tecnologías existentes, esta es la que mejor se acopla a la cantidad de energía que se puede obtener en las costas de México, específicamente en la costa de Rosarito, Baja California.

Dentro de este tipo de sistema de generación, existen dos tipos de OWC, que se ilustran en la figura 4.1.

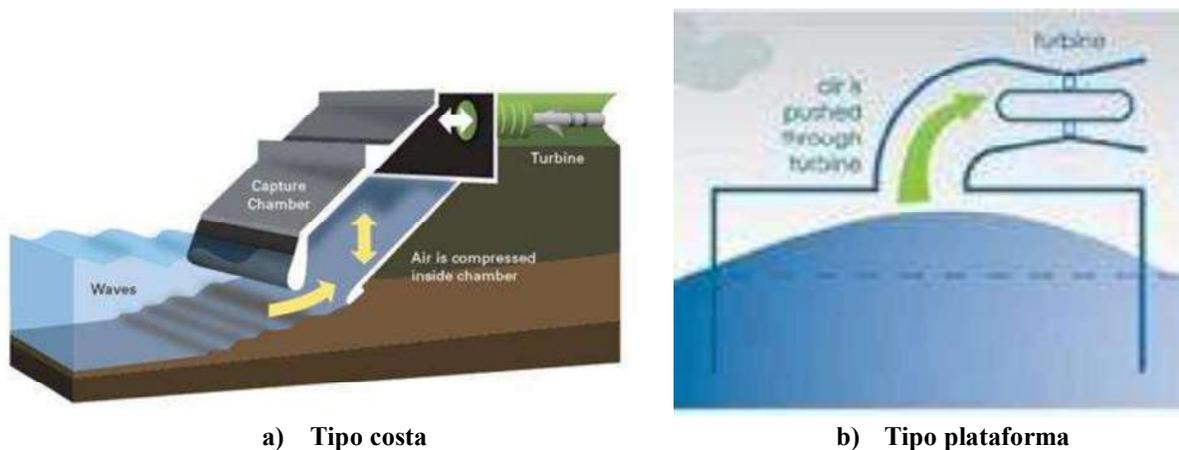


Figura 4.1 Sistemas de generación OWC.

Donde dependiendo de la geografía del lugar y la fuerza con que las olas golpean la costa, se puede construir alguno de estos dos tipos de sistema de generación OWC.

4.3 Sistema de generación

En la tecnología OWC, no son las olas las que mueven las turbinas directamente, sino una masa de aire comprimido que estas empujan. Se trata de una estructura generalmente ubicada en un rompeolas, cuya parte superior forma una cámara de aire como se muestra en la figura 4.2 (de ahí la masa comprimida), y cuya parte inferior está sumergida en el agua. De esta manera, la turbina aprovecha el movimiento provocado por la ola tanto cuando viene como cuando se va, y el generador doblemente alimentado (tanto por el rotor o parte móvil, como por el estator o parte fija) al que está acoplada, inyecta la energía en la red.

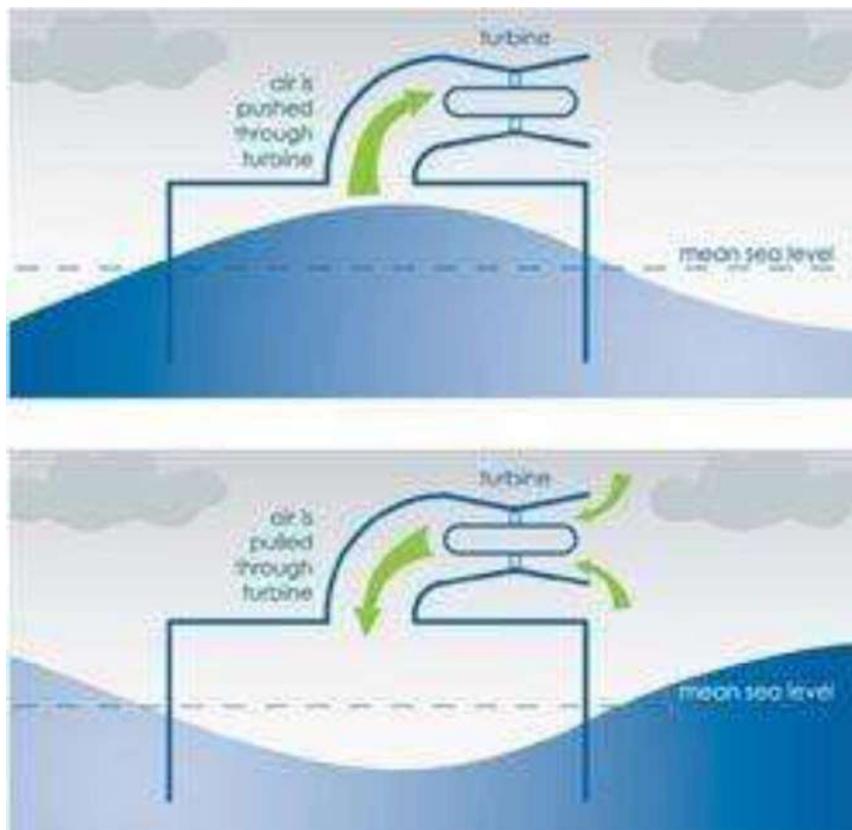


Figura 4.2 Funcionamiento OWC.

Uno de los principales problemas se refiere al denominado comportamiento en pérdida de la turbina. La turbina que se utiliza en estas instalaciones es de tipo Wells, y, debido a sus características, al chocar una ola extraordinariamente fuerte, la turbina puede estancarse y girar mucho más lenta de lo normal. Es necesario, adecuar la velocidad de la turbina. Asimismo, la investigación busca establecer la máxima potencia obtenible o poder fijar una potencia de referencia, lo cuál está relacionado también con el control de la turbina.

En la figura 4.3, se muestra la turbina Wells sin distribuidor (figura izquierda y centro) y con distribuidor (figura derecha).

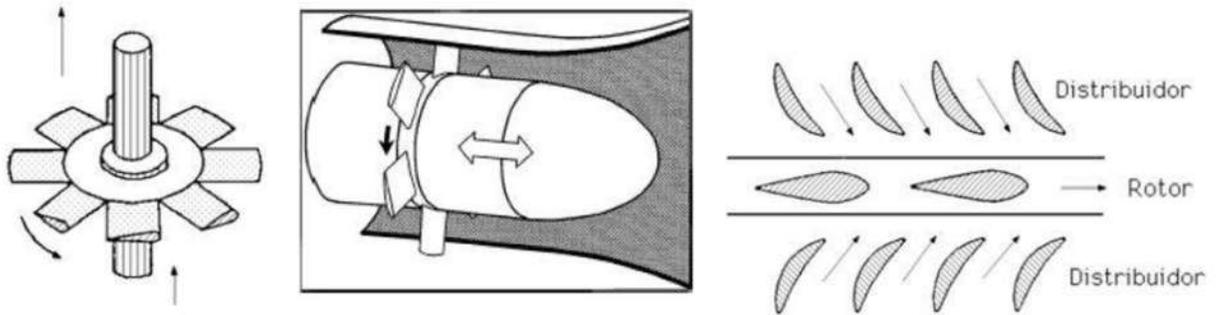


Figura 4.3 Turbina Wells.

Se trata de que el mismo generador haga girar la turbina a la velocidad óptima para entregar la máxima potencia, adecuándola en función de la presión provocada por las olas en cada momento. Asimismo, han combinado esta medida con el control de flujo de aire, que se basa en una válvula que se suele encontrar en la cámara de captura de los sistemas OWC y que consiste en controlar su nivel de apertura en función del flujo de aire.

La conversión primaria tiene lugar en la estructura hueca o cámara, caracterizada por que en ella no hay piezas móviles, de hecho es la propia columna de agua la que actúa como pistón, el área de la sección transversal de la cámara varía en el rango 40-250 m², para unos dispositivos de 60-500 KW de potencia nominal. A esta también se le conoce como cavidad resonante, ya que su funcionamiento se basa en la resonancia del oleaje y del movimiento del conjunto turbina – generador.

4.4 Comparación con otras alternativas de generación

En general, la generación de energía eléctrica consiste en transformar alguna clase de energía química, mecánica, térmica o luminosa, entre otras, en energía eléctrica. Para la generación industrial se recurre a instalaciones denominadas centrales eléctricas, que ejecutan alguna de las transformaciones citadas. Estas constituyen el primer escalón del sistema de suministro eléctrico.

La generación eléctrica se realiza, básicamente, mediante un generador, si bien estos no difieren entre sí en cuanto a su principio de funcionamiento, varían en función a la forma en que se accionan. Explicado de otro modo, difiere en que fuente de energía primaria utiliza para convertir la energía contenida en ella, en energía eléctrica.

A grandes rasgos las diferencias entre los sistemas de generación renovables y no renovables se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Diferencia entre energías renovables y convencionales.

RENOVABLES	CONVENCIONALES
Limpias	Contaminan
Inagotables	Limitadas
Autóctonas	Provocan dependencia exterior
Sin residuos	Generan residuos
Equilibran desajustes interterritoriales	Utilizan tecnología o recursos importados

4.4.1 Energía térmica

Una central termoeléctrica es una instalación empleada para la generación de energía eléctrica a partir de calor. Este calor puede obtenerse tanto de combustibles fósiles (petróleo, gas natural o carbón) como de la fisión nuclear del uranio u otro combustible nuclear o del sol como las solares termoeléctricas, como se muestra en la figura 4.4. Las centrales que en el futuro utilicen la fusión también serán centrales termoeléctricas.



a) Termoeléctrica a gas



b) Carboeléctrica



c) Planta nuclear



d) Termosolar

Figura 4.4 Diferentes plantas termoeléctricas.

Las centrales térmicas que usan combustibles fósiles liberan a la atmósfera dióxido de carbono (CO_2), considerado el principal gas responsable del calentamiento global. También, dependiendo del combustible utilizado, pueden emitir otros contaminantes como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas sólidas (polvo) y cantidades variables de residuos sólidos. Las centrales nucleares pueden contaminar en situaciones accidentales (accidente de Chernóbil) y también generan residuos radiactivos de diversa índole.

4.4.2 Energía hidráulica

Una central hidroeléctrica es aquella que se utiliza para la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía potencial del agua embalsada en una presa situada a más alto nivel que la central. El agua se lleva por una tubería de descarga a la sala de máquinas de la central, donde mediante enormes turbinas hidráulicas se produce la electricidad en alternadores. Las dos características principales de una central hidroeléctrica, desde el punto de vista de su capacidad de generación de electricidad son:

- La potencia, que es función del desnivel existente entre el nivel medio del embalse y el nivel medio de las aguas debajo de la central, y del caudal máximo aprovechable, además de las características de la turbina y del generador.
- La energía garantizada en un lapso determinado, generalmente un año, que está en función del volumen útil del embalse, de la pluviometría anual y de la potencia instalada.



Figura 4.5 Presa de las tres gargantas (hidroeléctrica, China).

Esta forma de energía posee problemas medioambientales al necesitar la construcción de grandes embalses en los que acumular el agua como se aprecia en la figura 4.5, que es sustraída de otros usos, incluso urbanos en algunas ocasiones.

4.4.3 Energía eólica y fotovoltaica

La energía eólica es la que se obtiene del viento, es decir, de la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire o de las vibraciones que el dicho viento produce. Los molinos de viento se han usado desde hace muchos siglos para moler el grano, bombear agua u otras tareas que requieren una energía. En la actualidad se usan aerogeneradores para generar electricidad como se observa en la figura 4.6, especialmente en áreas expuestas a vientos frecuentes, como zonas costeras, alturas montañosas o islas.



Figura 4.6 Aerogenerador.

El impacto medioambiental de este sistema de obtención de energía es relativamente bajo, pudiéndose nombrar el impacto estético, porque deforman el paisaje, la muerte de aves por choque con las aspas de los molinos o la necesidad de extensiones grandes de territorio que se sustraen de otros usos. Además, este tipo de energía, al igual que la solar o la hidroeléctrica, están fuertemente condicionadas por las condiciones climatológicas, siendo aleatoria la disponibilidad de las mismas.

Por su parte la energía solar fotovoltaica a la obtención de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos. Los paneles, módulos o colectores fotovoltaicos están formados por dispositivos

semiconductores tipo diodo que, al recibir radiación solar, se excitan y provocan saltos electrónicos, generando una pequeña diferencia de potencial en sus extremos. El acoplamiento en serie de varios de estos fotodiodos permite la obtención de voltajes mayores en configuraciones muy sencillas y aptas para alimentar pequeños dispositivos electrónicos.



Figura 4.7 Panel solar.

Los principales problemas de este tipo de energía son su elevado coste en comparación con los otros métodos, la necesidad de extensiones grandes de territorio que se sustraen de otros usos (Figura 4.7), la competencia del principal material con el que se construyen con otros usos (el sílice es el principal componente de los circuitos integrados), o su dependencia con las condiciones climatológicas. Este último problema hace que sean necesarios sistemas de almacenamiento de energía para que la potencia generada en un momento determinado, pueda usarse cuando se solicite su consumo.

4.4.4 Energía undimotriz

Entre los sistemas de generación que se nombran en este trabajo, también cuentan con diferencias o características especiales para que tengan un correcto funcionamiento.

Los principales tipos de captación son (Figura 4.8):

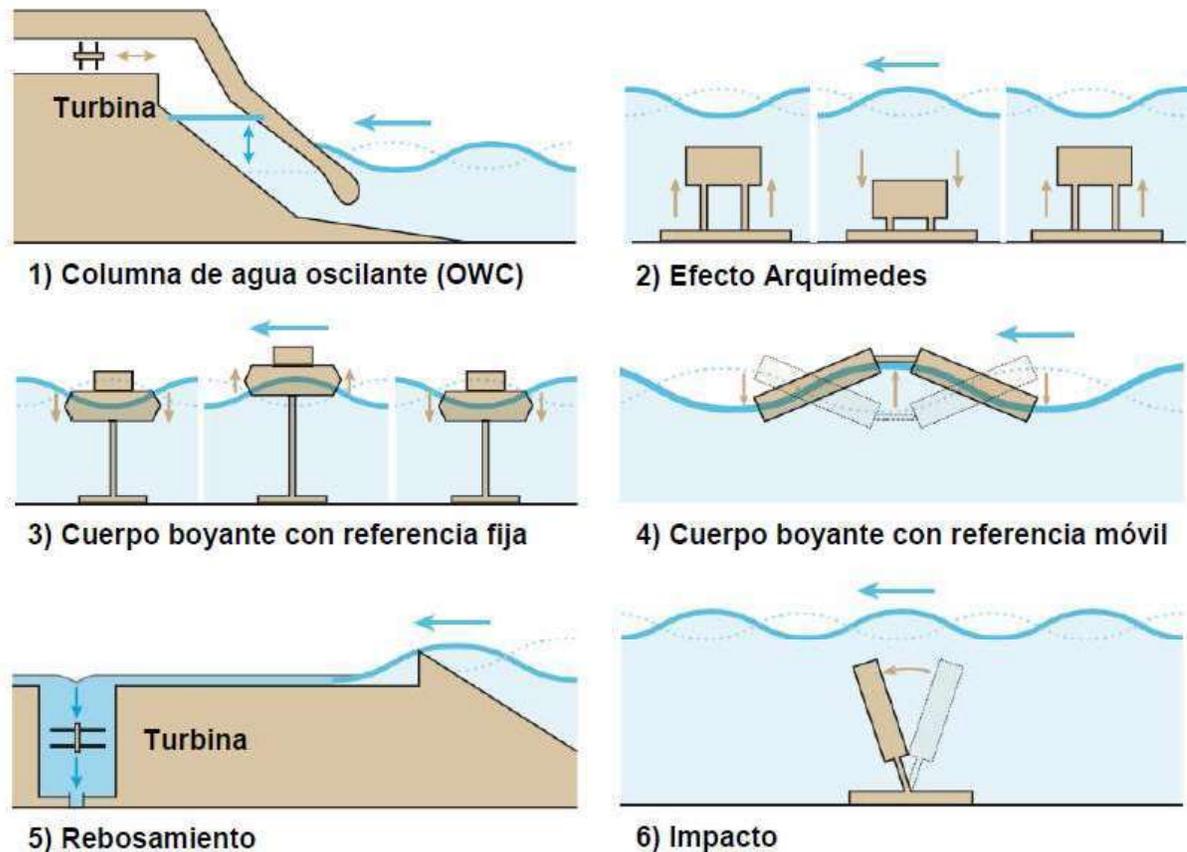


Figura 4.8 Comparativa de sistemas de generación undimotriz.

1) Columna de agua oscilante: La presión del agua se transmite al aire que a su vez mueve una turbina, este tipo de sistema no requiere de grandes olas para poder generar electricidad.

2) Arquímedes: Se basa en el movimiento relativo entre dos cuerpos que presurizan el fluido contenido en el interior, pero uno de sus inconvenientes es que requiere de una profundidad mínima para su funcionamiento.

3) Boya con referencia fija: boyas que flotan libremente con un elemento de amarre que incorpora el sistema de extracción de energía, las cuales dependen mucho del anclaje que las mantiene en su posición fija y son vulnerables ante huracanes.

4) Cuerpo boyante con referencia móvil: La energía se extrae por el movimiento relativo las diferentes partes de la estructura, por su longitud requieren de grandes extensiones de mar para su funcionamiento.

5) Dispositivos de rebase: pueden estar flotando o fijos al fondo, almacenan el agua del oleaje que incide para accionar una turbina. Aprovechan, por lo tanto, la energía potencial del oleaje, pero dependen de alturas mínimas de ola para estar llenando su embalse.

6) Aparatos de impacto o pendulares: aprovechan la energía horizontal de las olas para mover un pistón que a su vez acciona la turbina. Aprovechan una cantidad pequeña de la energía cinética incidente.

Las ventajas medioambientales de las energías renovables son quizá las más conocidas aunque no son las únicas. Las principales ventajas medioambientales son las siguientes:

- Las energías renovables son inagotables, ya sea por la magnitud del recurso o por su regeneración natural.
- Las energías renovables son limpias y no generan residuos de difícil (y costoso) tratamiento.
- Las energías renovables no producen emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes a la atmósfera. En el caso de la bioenergía la planta, en su crecimiento, absorbe el CO₂ que posteriormente emitirá en su combustión.

Las ventajas socioeconómicas de las energías renovables son menos conocidas pero de una importancia fundamental a la hora de garantizar un suministro energético propio. Resumimos a continuación las principales ventajas estratégicas y socioeconómicas:

- Las energías renovables son autóctonas. A diferencia de los combustibles fósiles que sólo existen en unas zonas limitadas, las energías renovables están disponibles, en mayor o menor medida, en todo el planeta.
- Las energías renovables evitan la dependencia exterior. De esta manera se reducen las pérdidas en transporte y se garantiza un suministro propio de la energía.
- Las energías renovables crean cinco veces más puestos de trabajo que las convencionales.

- Las energías renovables contribuyen decisivamente al equilibrio interterritorial porque suelen instalarse en zonas rurales.

4.5 Generalización del sistema

El sistema en el cuál se enfoca este trabajo es, el de columna de agua oscilante (OWC), el cuál está formado por una cavidad la cual está en contacto directo con el oleaje, dicha cavidad contiene un espacio donde se encuentra el aire, el cual al subir el nivel del agua debido a la llegada de una ola, este aire es comprimido y expulsado por una cavidad de menor diámetro (Figura 4.9) en la cual se encuentra alojada la turbina y el generador.

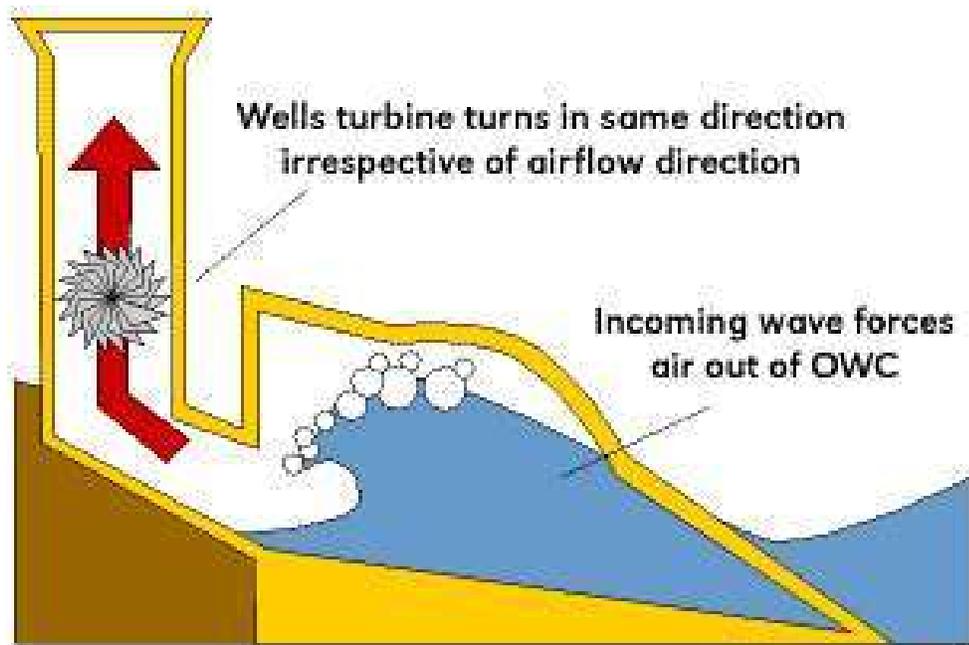


Figura 4.9 El aire es expulsado.

Por la construcción de la turbina empleada en este sistema de generación, el sentido de giro de esta es en el mismo sentido sin importar la dirección del aire.

Al llegar la ola a su máxima altura, esta comienza a regresar, provocando que ese aire que fue expulsado en un inicio ahora sea absorbido para volver a llenar la cavidad de aire (Figura 4.10), por lo que vuelve a circular aire a través de la turbina la cual continúa girando en el mismo sentido.

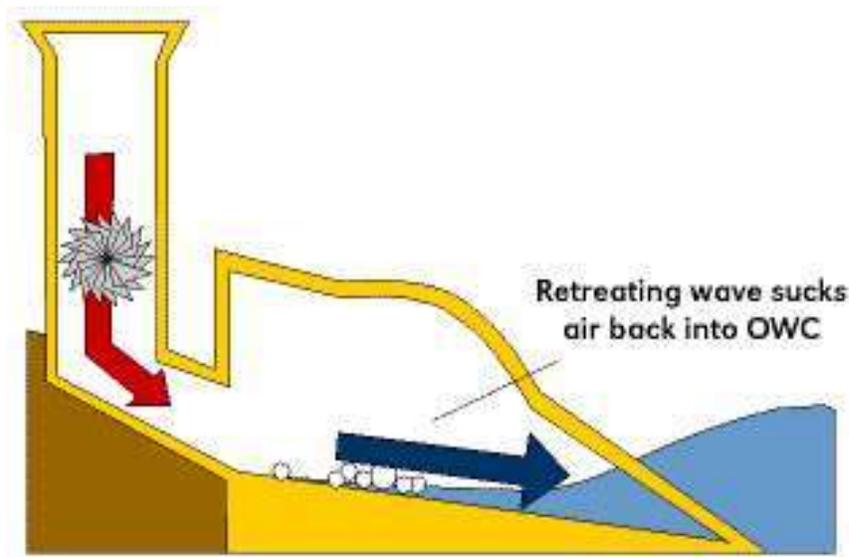


Figura 4.10 El aire es absorbido.

Con lo que al repetirse el ciclo del vaivén de las olas, proporciona un giro constante en la turbina, con lo cual, acoplada a un generador, este convierte esa energía mecánica de la turbina en energía eléctrica.

Este tipo de sistema de generación como depende del tamaño y frecuencia de las olas, no se puede conseguir una velocidad constante en la turbina por lo cual no se tiene una generación constante, por lo que es indispensable el uso de inversores, como se hace en los parques eólicos, para suministrar a la red un flujo constante de energía.

Este tipo de sistema se puede instalar en los márgenes de las costas o mar adentro, como se muestra en la figura 4.11, esto depende en gran parte a la ubicación específica de las olas apropiadas para este sistema de generación.



a) OWC costa



b) OWC mar adentro

Figura 4.11 OWC en costa y mar adentro.

4.5.1 Propuesta del proyecto

De las diferentes zonas de costa con las que cuenta México, el mejor lugar en donde se tienen olas con la altura y periodo más grandes y aptos para el aprovechamiento de la energía undimotriz, se encuentra la costa de Rosarito Baja California.

Por esta razón se toma como lugar de estudio esta costa, de donde, en una página para surfistas, se encuentran los siguientes datos de interés mostrados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Olas en Rosarito, Baja California. [Fuente: www.windguru.cz]

GFS 18.11.2010 18 UTC	Ju 18. 18h	Ju 18. 18h	Ju 18. 18h	Ju 18. 21h	Vie 19. 03h	Vie 19. 06h	Vie 19. 09h	Vie 19. 12h	Vie 19. 15h	Vie 19. 18h	Vie 19. 21h	Sa 20. 03h	Sa 20. 06h	Sa 20. 09h	Sa 20. 12h	Sa 20. 15h	Sa 20. 18h	Sa 20. 21h	Do 21. 03h	Do 21. 06h	Do 21. 09h	Do 21. 12h	Do 21. 15h	Do 21. 18h	Do 21. 21h	Lu 22. 03h	Lu 22. 06h	
Velocidad viento (nudos)	5	7	6	2	3	0	3	6	8	6	6	8	8	12	16	14	11	9	6	5	2	2	6	5	3	6	6	
Rachas viento (nudos)	5	7	6	3	3	1	4	6	9	7	8	10	11	15	20	20	17	13	7	7	5	5	8	7	4	8	9	
Dirección viento	↘	↘	↘	↓	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
Ola (m)	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1	1	1	1	0.9	1.1	1.1	1.1	1.2	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.6	1.7	
Periodo olas (seg.)	14	14	14	14	13	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	9	10	9	9	9	15	11	11	9	11	13	13	
Dirección olas	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	
*Temperatura (°C)	16	19	17	13	13	12	13	17	17	15	13	13	14	14	16	15	15	15	12	11	11	14	15	14	11	11	11	
Nubosidad (%) alta / media / baja	-	-	-	-	36	61	94	96	68	61	47	20	11	11	5	23	51	13	7	-	-	-	-	-	-	-	-	
Lluvia (mm/3h)	-	-	-	-	-	-	-	-	5	20	39	57	69	90	74	95	90	86	27	14	-	-	-	12	25	9	61	53

De donde podemos observar que, dentro de esta tabla se encuentran los datos de nuestro interés, los cuales son la altura de las olas, así como el periodo de las mismas.

En base a estos datos, observamos que los periodos de las olas van desde los 9 hasta los 15 segundos, así como las alturas de las mismas, que varían desde los 0.9 hasta los 1.7 metros de altura.

Con estos dos datos máximos y mínimos, hacemos el cálculo realizado en el capítulo 3.4 de la potencia por frente de ola definida por la ecuación (3.5), teniendo como resultado lo siguiente:

Para los datos de la tabla 4.2, con altura de 0.9m con periodo de 12seg, se obtiene un flujo de energía de:

$$FE = \frac{\rho g H^2}{8} C_g$$
$$FE_{\min} = \frac{(1028)(9.8)(0.9)^2}{8} (9.3678) = 9.56 \text{ kW/m}$$

Mientras que para los datos de la tabla 3.2, con altura de 1.7m con periodo de 13seg, el flujo de energía será de:

$$FE = \frac{\rho g H^2}{8} C_g$$
$$FE_{\max} = \frac{(1028)(9.8)(1.7)^2}{8} (10.1485) = 36.97 \text{ kW/m}$$

En base a esto, podemos ver que, en una buena temporada se puede tener una energía de 37 kW/m, así como cuando se tienen las olas más bajas se tendrá una energía mínima de las mismas de aproximadamente 10 kW/m.

Para la conversión mecánica – eléctrica, es decir, la fuerza que va a proporcionar el movimiento de las olas poderlo utilizar para generar energía eléctrica, es necesario definir las características básicas con las que debe de contar el generador eléctrico.

Para comenzar con esto, se sabe que la instalación de un generador undimotriz, por la naturaleza del lugar de donde se obtendrá la energía mecánica, es dentro del mar, por lo que es necesario que el generador a utilizar no ocupo otra fuente de energía más que la del mar, por ello se opta por seleccionar un generador que sea asíncrono, ya que la naturaleza de la fuente de energía mecánica, es decir, las olas, no son constantes, por lo que mantener una velocidad constantes es prácticamente imposible, por tal motivo el generador asíncrono, por su construcción es capaz de generar a diferentes velocidades, además de esto, es necesario que sea de imanes permanentes, ya que por la misma ubicación sería difícil y caro hacer llegar la energía para excitar el generador para que pueda generar, por este motivo, se escoge uno de imanes permanentes.

Dicho lo anterior, vemos que se va a necesitar que el generador tenga una capacidad máxima de generación de aproximadamente 37 kW, que sería cuando se tienen las mejores olas en cuanto a su periodo y altura.

La velocidad óptima de este generador será de 900 rpm, es decir, un generador de 8 polos.

Tomando como base la ley de inducción de Faraday, se obtiene el valor de las bobinas así como el voltaje inducido a partir de una intensidad de campo magnético proporcionado por los imanes.

En base a esto, primero debemos de saber cuál es la corriente de línea necesaria para generar la potencia deseada, esto lo obtenemos simplemente con la fórmula de potencia trifásica para maquinas eléctricas.

$$P = \sqrt{3}VI \cos(\phi) \quad (4.1)$$

Donde el $\cos(\phi)$ es el factor de potencia, siendo este del 80% en la mayoría de las máquinas eléctricas.

A partir de la ecuación (4.1), despejamos la corriente, ya que los demás valores los conocemos, los cuales son:

$$P = 37kW$$

$$V = 220V$$

$$\cos(\phi) = 0.8$$

En base a esto obtenemos una corriente necesaria de:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos(\phi)} = \frac{37kW}{\sqrt{3} * 220V * 0.8} = 121.3747A$$

A partir de esta corriente podemos definir los parámetros básicos de un generador.

Para ejemplificar esta parte hacemos uso de las ecuaciones propuestas por la ley de inducción de Faraday, las cuales son:

Voltaje inducido

$$\begin{aligned}\varepsilon_L &= -N \frac{d\phi}{dt} \\ \varepsilon_L &= -L \frac{di}{dt}\end{aligned}\tag{4.2}$$

A partir de la cual, tenemos que la inductancia es:

$$L = \frac{N\phi}{i}\tag{4.3}$$

El flujo magnético y el voltaje inducido se calculan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\phi = BA\tag{4.4}$$

$$\varepsilon = NA \left| \frac{dB}{dt} \right| w\tag{4.5}$$

Para la demostración del diseño propuesto de generador, suponemos que las bobinas de rotor son de forma rectangular de 50cm de largo por 10cm de ancho y cada una de ellas es de 100 vueltas, la intensidad de campo magnético (B), se toma de un valor de 0.5 teslas, este valor es tomado de la tabla 3.2 donde se muestran algunos de los materiales magnéticos, para este caso el isotrópico libre de cobalto cumple con la intensidad de campo requerida.

Con los datos proporcionados anteriormente, y las ecuaciones anteriormente definidas de la ley de inducción de Faraday podemos decir entonces que:

El área de la bobina es de:

$$A = (0.5m)(0.1m) = 0.05m^2$$

El flujo magnético en base a la intensidad de 0.5 teslas definidos anteriormente será de:

$$\phi = BA = (0.5T)(0.05m^2) = 0.025Wb$$

Para obtener el valor de la inductancia, consideramos el número de vueltas de la bobina que es de 100, el flujo magnético que se obtuvo anteriormente y el valor de la corriente que se obtuvo en base a la ecuación (4.1), teniendo como resultado:

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{(100vueltas)(0.025Wb)}{121.3747A} = 20.5973mH$$

Con el valor de esta bobina se puede obtener la corriente inducida deseada en base a la intensidad de campo magnético que se definió anteriormente, así como considerando las dimensiones de la misma. Ahora sólo falta comprobar que el voltaje inducido sea similar el voltaje que se desea a la salida del generador, es decir, que se tengan 220V de línea en las salidas del generador, para comprobar esto usamos la ecuación (4.5), pero antes de esto, obtenemos la velocidad síncrona de nuestro generados de la siguiente forma:

$$w = \eta = \frac{120f}{polos} = \frac{120(60Hz)}{8 polos} = 900rpm = 15rps = 94.2477 \text{ rad/seg}$$

Una vez obtenida la velocidad síncrona de nuestro generador, calculamos el voltaje inducido con la ecuación (4.5):

$$\varepsilon = NA|B|w = (100vueltas)(0.05m^2)(0.5T)(94.24 \text{ rad/seg}) = 235.61V$$

De esta forma podemos decir que:

Con un campo magnético de 0.5 teslas de intensidad sobre una bobina de 20.6 mili henrios, en donde la bobina gire a una velocidad de 900rpm dentro del campo magnético, se podrá tener una generación máxima de potencia de alrededor de 37kW.

Una propuesta del diseño del generador se muestra en las figuras 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15 con un poco más de detalle, las figuras se encuentran acotadas en centímetros.

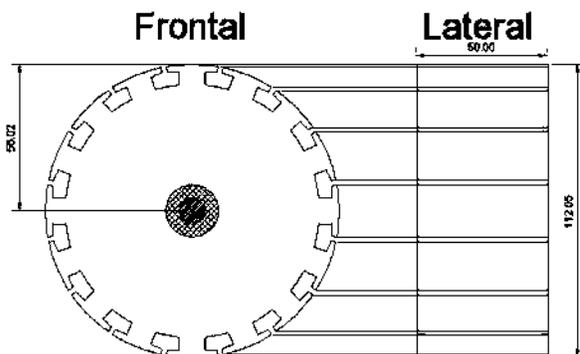


Figura 4.12 Vistas del rotor.

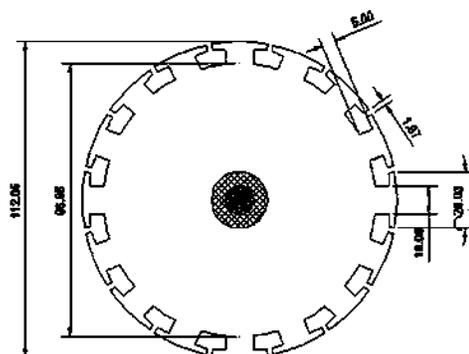


Figura 4.13 Rotor.

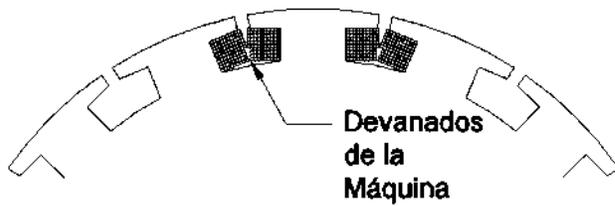


Figura 4.14 Devanados del rotor.

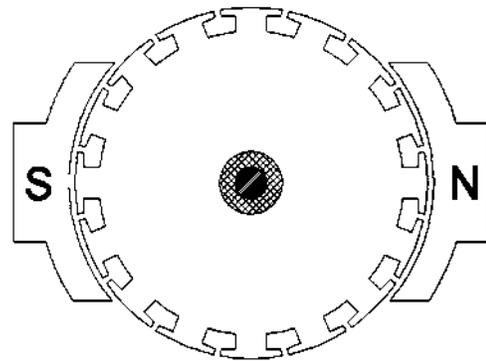


Figura 4.15 Generador de imanes permanentes.

Tomando como referencia los valores obtenidos anteriormente en el capítulo 3, podemos establecer un comportamiento a diferentes velocidades de generación hasta llegar a la velocidad óptima de nuestro generador, como se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Generación eléctrica según la velocidad.

RPM	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
0	0	0	0
60	14.7026536	8.091664	164.848189
120	29.4053072	16.183328	659.392756
180	44.1079609	24.274992	1483.6337
240	58.8106145	32.366656	2637.57103
300	73.5132681	40.45832	4121.20473
360	88.2159217	48.549984	5934.53481
420	102.918575	56.641648	8077.56127
480	117.621229	64.733312	10550.2841
540	132.323883	72.824976	13352.7033
600	147.026536	80.91664	16484.8189
660	161.72919	89.008304	19946.6309
720	176.431843	97.099968	23738.1392
780	191.134497	105.191632	27859.344
840	205.837151	113.283296	32310.2451
900	220.539804	121.37496	37090.8425

La propuesta de este sistema de generación se basa de forma similar al de una plataforma petrolera, aunque de menor tamaño (Figura 4.16), la cuál estaría anclada al fondo del lecho marino, la cavidad resonante, o donde se aloja la columna de agua, será una estructura de al menos 10 x 10 metros de ancho y largo, por unos 10 metros de altura.

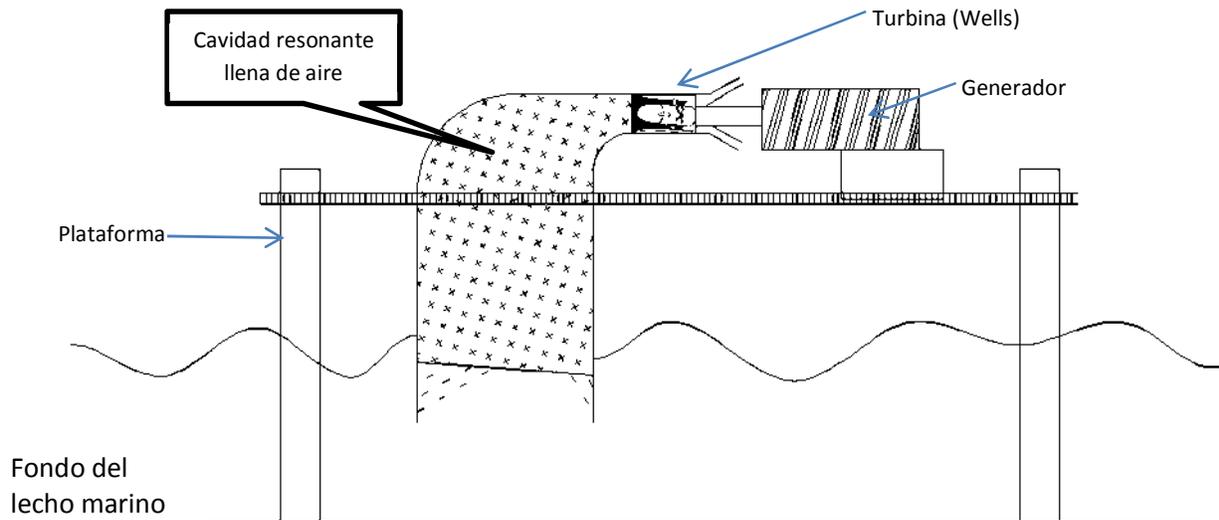


Figura 4.16 Propuesta del sistema de generación.

Este tipo de plataforma ocuparía un área total de 400m^2 , y como anteriormente se demostró tendría una capacidad de generación de entre 10 – 37 KW.

Por lo que suponiendo que una casa habitación puede tener una demanda máxima de 2 KW, este sistema de generación será capaz de suministrar la energía necesaria para alimentar entre 5 y 18 casas, esto es considerándolo como único sistema.

Por otra parte si se consideran varios sistemas de generación de este tipo conectados entre sí, formando un parque de OWC, la generación obtenida al final será mayor, por lo que se podrá suministrar de energía a más hogares.

Supongamos que se tiene un parque de OWC con 9 de estos generadores, como se muestra en la figura 4.17.

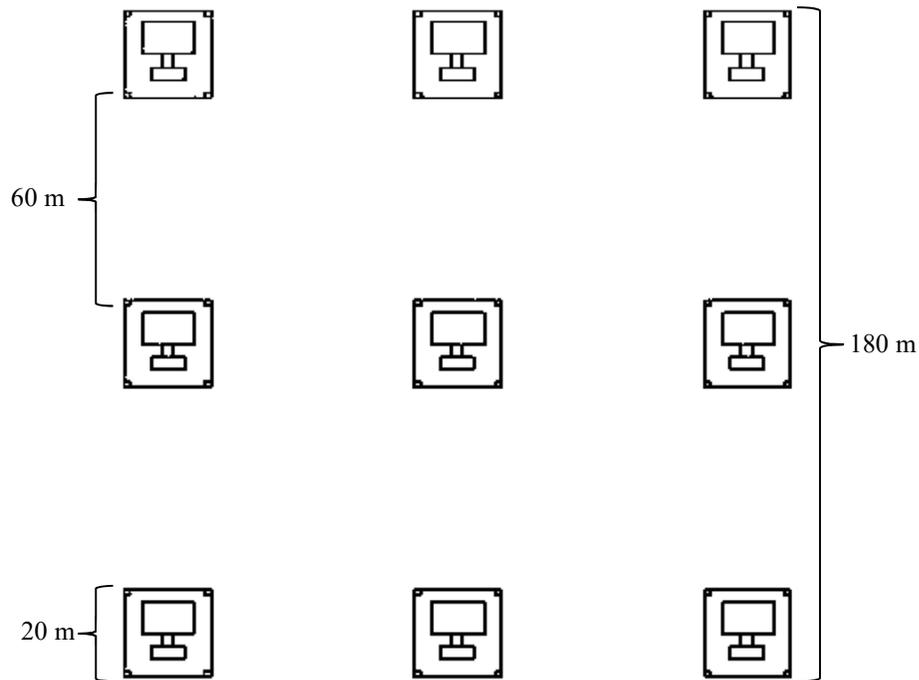


Figura 4.17 Propuesta de parque OWC.

Un parque de este tipo sólo ocuparía una extensión de 32,400 m² de mar, por lo que con generadores más eficientes y al menos el doble de extensión para la instalación de más sistemas de generación de este tipo, se podrían obtener potencias de generación competitivas a las convencionales existentes.

En el caso particular de estos 9 generadores, la potencia combinada entre ellos alcanzará valores entre los 90 – 333 KW, por lo que se podrá suministrar de energía aproximadamente a 150 hogares.

Por otra parte, al tratarse de un sistema de generación que se encuentra en altamar, es necesario transmitir la energía generada por medio de cables subacuáticos (Figura 4.18), los cuales llegarán a la franja de la costa donde se encontrara una subestación eléctrica para la distribución de dicha energía generada.

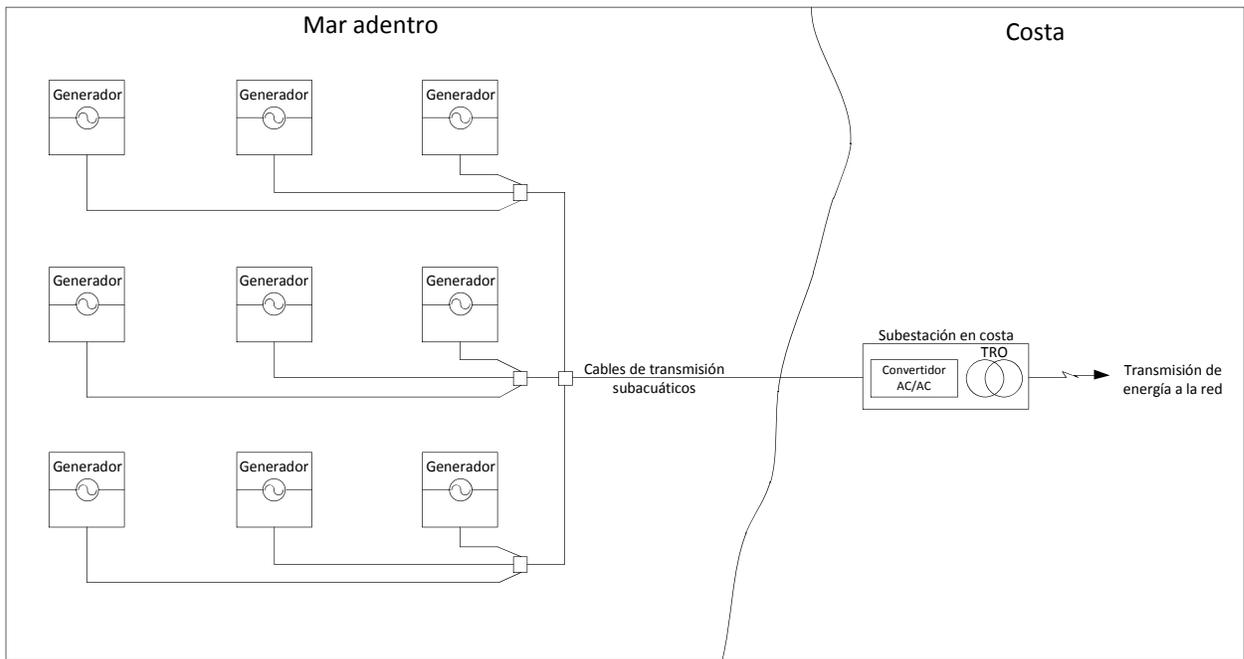


Figura 4.18 Conexión a la red de los OWC's.

Para complementar este sistema de generación, es necesario tener un convertidor AC / AC, ya que como la generación de este tipo de sistemas no es constante, ya que dependen de la velocidad con que llegan las olas, lo cual provoca que se tengan valores mínimos y máximos de generación durante un cierto periodo de tiempo. Debido a esto es necesario usar este tipo de convertidores como se hace en los parques de aerogeneradores, para poder suministrar a la red un flujo constante de energía sin tener muchas perturbaciones.

Finalmente, esta propuesta de sistema de generación es capaz de generar hasta 335KW, pero actualmente existen sistemas que con un sólo generador son capaces de generar hasta 500KW, aunque gran parte de esta generación depende de la intensidad de las olas, pero es un claro ejemplo que existen infinidad de sistemas de generación alternativos que son amigables con el ambiente y se podría dar un gran paso si los recursos que actualmente se gastan en la exploración de nuevos yacimientos de petróleo se usaran para la investigación y desarrollo de estos sistemas de generación.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se ha hecho una completa revisión de las manifestaciones de energía del océano y los métodos de extracción de aquellas aplicables en la generación de energía eléctrica, en el Capítulo 2. Particularmente ha sido estudiada la energía contenida en las olas y las tecnologías existentes.

El alternador de imanes permanentes resulta ser la alternativa de generación más atractiva que se encuentra disponible en el mercado para la generación a velocidad variable y aislada de la red de potencia. El resto de los generadores eléctricos son concebidos para su funcionamiento con motores diesel o sistemas donde, a pesar trabajar a una velocidad de giro variable, no se ven sometidos a las altas fluctuaciones a las que se podría ver enfrentado el generador undimotriz.

A diferencia de los alternadores auto excitados con inducción electromagnética, el alternador de imanes permanentes no necesita de una velocidad mínima para operar, produciendo electricidad a bajas velocidades. Tiene una característica de potencia versus velocidad casi lineal, además de una alta eficiencia de conversión. Resultan económicos y de bajo mantenimiento al no necesitar anillos ni escobillas.

Las energías renovables tienen por definición la gran ventaja de ser recursos limpios con escaso impacto ambiental que proceden de una fuente natural inagotable. El caso tratado en esta tesis es uno de ellos: la energía undimotriz o del oleaje. Con un funcionamiento eficiente de ésta, se reduciría la dependencia exterior al combustible fósil y permitiría mayor autonomía energética al país.

En el mercado actual dista mucho de ser una energía competitiva. La inversión inicial requerida por un proyecto de esta magnitud es muy elevada y contiene una componente de riesgo difícil de asumir. No sólo ésta es desorbitada, sino que también lo son los posteriores costes de instalación, operación y mantenimiento. Los dispositivos alejados de la costa tienen una componente

adicional debida al sistema de amarre, que debe ser revisado y sustituido cada poco tiempo. La tendencia con el tiempo es que la tecnología sea cada vez más competitiva con el resto gracias, entre otros factores, a la posibilidad de construir dispositivos más potentes que reduzcan el coste por kW y a la mejora de los rendimientos.

Es necesario conocer en la medida de lo posible el rango y la frecuencia de los distintos periodos y alturas de ola presentes para tratar de que el diseño no opere por debajo de las posibilidades de la zona ni por lo contrario, esté sobredimensionada y actúe por debajo del punto de eficiencia óptima.

El sector eléctrico de nuestro país no cuenta con la suficiente experiencia en campo como para poder estimar de forma precisa los costes correspondientes al funcionamiento operativo de un parque de olas comercial. Únicamente se conocen valores aproximados de parte del coste capital de algunos dispositivos, sin embargo, es posible establecer una aproximación del resto a partir de la experiencia en instalaciones de gas o petróleo y en parques eólicos.

Los sistemas en los que se ha centrado la tesis tienen la principal ventaja respecto a los anteriores dispositivos de estar situados en aguas profundas (>40m), donde existe un potencial energético mayor que en la costa. Por otro lado, aparecen otras dificultades; coste y complejidad de la instalación, mala accesibilidad para mantenimiento y reparación, sistema de amarre y estructura costosos e interferencias con el tráfico marítimo.

5.2 Recomendaciones

Aunque son varios los dispositivos en desarrollo, aún quedan importantes retos tecnológicos que solucionar para poder implementar un sistema de generación de este tipo en nuestro país, los cuales podemos agrupar como:

- Tecnología de conversión energética: Hay que superar los problemas originados por la discontinuidad de la energía y las irregularidades en amplitud, fase y dirección de las olas. Además, estos sistemas necesitan de cargas estructurales muy altas para supervivencia en condiciones extremas.

- Conexión a la red eléctrica: Debido a que el periodo del oleaje es lento (0,1 Hz) frente a la red eléctrica a conectar (60 Hz). También existen problemas de estabilidad de conexión a la red, así como la falta de infraestructuras eléctricas próximas a la costa.
- Además de ser capaces de desarrollar unos sistemas robustos y fiables para poder soportar las adversas condiciones climatológicas a las que estos sistemas pueden llegar a verse sometidos, de las cuales se pueden tomar como ejemplo o base de desarrollo las plataformas petroleras ya existentes de la paraestatal PEMEX.

Los costos estimados en la actualidad por generación eléctrica en base a este tipo de sistema comparado con otros, se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Costos de generación.

Sistema de generación	Undimotriz	Solar	Eólica	Biomasa	Gas natural y carbón
Costo por KW/h (¢ de dll)	15¢	9-19¢	5-24¢	9-14¢	7-15¢

Además de lo anterior también se debe de considerar el costo capital, el cual incluye: proyecto (dispositivo, cableado submarino, transporte de la energía y conexión), estructura (materiales, componentes, procesos y el sistema de conversión), instalación del dispositivo, cimentación, amarres y conexión a la red local.

Donde muchos de estos conceptos ya están siendo perfeccionados en países europeos que tienen un mayor grado de desarrollo en estas tecnologías con lo cual solo sería cuestión de tiempo para que comiencen a ser comerciales estos sistemas de generación, con lo que facilitaría el cambio a nuevas formas de generación eléctrica.

El costo de operación y mantenimiento involucrado en estos sistemas de generación incluye: mantenimiento (previsto e inesperados), revisiones del funcionamiento, recolocación y sustitución de elementos, licencias y seguros que permitan mantener los dispositivos y cubrir riesgos y monitoreo de las condiciones de oleaje y el funcionamiento.

Las tecnologías más prometedoras respecto a estos sistemas de generación son:

- Archimedes wave swing (AWS), se está desarrollando un nuevo modelo pre comercial de 250kW.

- Aquabuoy, muy similar al dispositivo Powerbuoy, se ha probado una boya piloto de 250kW con la intención de construir una planta de 1MW.
- Pelamis wave power, actualmente existe el prototipo pre comercial Pelamis desarrollado más innovador con 750kW de potencia máxima.
- Wave Dragon, es el dispositivo más avanzado en cuanto a la tipología de los terminadores, se ha llegado a probar un prototipo pre comercial de 4MW.
- La tecnología OWC tiene una producción máxima de 500 KW. El rendimiento ha sido mejorado para un promedio anual de intensidad de olas entre 15 y 25 KW/m.

Este último sistema (OWC), es el de mayor importancia y el propuesto en este trabajo, ya que es ideal para lugares donde no se tienen olas de gran magnitud, por lo que en las costas de México este tipo de sistema de generación es el que mejor se acopla a las condiciones marítimas con las que cuenta nuestro país.

La propuesta de este sistema de generación podría tener un efecto significativo en la reducción de emisiones de gases invernadero, al tener unidades instaladas que en conjunto producirán más de 1,000,000 MWh/año de energía a nivel mundial, lo que evitará que 1,000,000 de toneladas de dióxido de carbono sean emitidas y enviadas a la atmósfera.

La finalidad de este trabajo es promover una tecnología que ofrece un avance significativo para la reducción de las emisiones de gases invernadero, y que debería ser parte integral de los esfuerzos que todos los países realizarán para cumplir sus compromisos internacionales al respecto.

Por último, sólo debemos de recordar la importancia de la diversificación del sector energético. Si se pasa por alto la energía de las olas, se estaría dando un paso hacia atrás al indicado por las necesidades actuales; nos enfrentamos a una situación y a un futuro energético tal que debemos aprovechar todos los recursos disponibles, no reparando tanto en costos como en beneficios y oportunidades.

“Hoy por hoy, no es una energía que podamos menospreciar”

Bibliografía

- 1. Fuentes alternativas de generación de energía, incentivos y mandatos regulatorios.** Zapata, Carlos. Abril 2005.
- 2. Energías marinas.** Ayza, José.
- 3. Tendencias energéticas, hacia un futuro más seguro y con menos carbono.** Tanaka, Nobuo.
- 4. Generador de imanes permanentes en la generación de energía.** Yoel, Ernesto.
- 5. Estudio del estado del arte en cuanto a sistemas de generación undimotriz existentes.** Instituto Tecnológico de las Energías Renovables. Febrero 2007.
- 6. La gestión de la energía desde una perspectiva sistemática.** Jaramillo, Jorge Luis.
- 7. Técnicas para aprovechar la energía de las olas.** Notas del doctor Gilberto Gonzales Avalos. UMSNH 2010.
- 8. Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de la electricidad.** Fernández, Julia. Septiembre 2008.
- 9. Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de prototipos captadores.** Cavia, Berta.
- 10. Energía undimotriz en España: boyas y serpientes.** Martínez, Alberto. Noviembre 2008.

11. **Energy from waves, Power from the waves, Scuppering the waves.** Ross, David.
12. **Máquinas Eléctricas y Electromecánicas.** SYED A. NASAR, PH. D.
13. **Información Oceanográfica para la Aplicación de la Generación de Energía.** Henríquez Olavarría, Andrés. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, 2008.
14. **Design considerations for ocean energy resource systems.** Bregman, Ron, Knapp, R. H. y Takahashi. Hawaii Univ. 1995.
15. **Wikipedia.** Energía undimotriz. http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_undimotriz
16. **Oceanlinx.** greenWAVE, blueWAVE . <http://www.oceanlinx.com/>
17. **OPT.** Technology. www.oceanpowertechnologies.com
18. **Unicamp.** <http://www.unicamp.br/unicamp/es>
19. **renovables.wordpress.com**
20. **Red Permacultura.** Energía Undimotriz. www.redpermacultura.org
21. **EL UNIVERSAL.** Energía renovable, una revolución tecnológica. www.eluniversal.com.mx
22. **EROSKI CONSUMER.** Tecnología undimotriz: energía de las olas. <http://www.consumer.es>