



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE:
COLUMNA OSCILANTE DE AGUA**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
VÍCTOR EFRÉN GUADARRAMA VILCHIS

TUTOR PRINCIPAL
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE DEL 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Echávez Aldape Gabriel
Secretario: Dr. Gracia Sánchez Jesús
Vocal: Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo
1^{er.} Suplente: Dr. Silva Casarín Rodolfo
2^{do.} Suplente: Dr. Carmona Paredes Rafael Bernardo

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

FIRMA

Agradezco Al Dr. Edgar Mendoza y al Dr. Rodolfo Silva por el invaluable conocimiento transmitido en el aula y durante la realización de esta tesis.

Al cariño que me han brindado mis padres y hermana durante todo este tiempo.

Al todo poderoso por permitirme corregir mi camino.

Análisis integral del sistema de explotación de energía undimotriz:

Columna Oscilante de Agua

Resumen

Este trabajo expone el proceso por el cual se aprovecha la energía de las olas. Primero se estudia la física del oleaje que permite entre otras cosas, conocer la energía que transporta el oleaje y sus variaciones en el tiempo. Se cuenta con una base de datos de oleaje que describe el entorno marítimo; con lo anterior se puede calcular el potencial energético undimotriz que es el total de energía disponible.

Una vez clasificado el estado de mar se plantea la cuestión de cuanto del total de la energía del oleaje es propicia de ser convertida en electricidad, la respuesta está en función de la eficiencia del *convertor de energía del oleaje*, se identifican dos procesos principales, el primero involucra una instalación marítima que permite obtener energía mecánica a partir de la agitación del agua producida por el oleaje, lo anterior se realiza mediante una gama muy variada de principios físicos que en su mayoría aprovechan el impulso y las variaciones del espejo de agua generados por las perturbaciones del aire sobre la superficie del océano; la segunda etapa del sistema de conversión se refiere al método por el cual se transforma la energía mecánica en electricidad la cual se realiza mediante un generador de inducción magnética. Este vínculo entre la energía hidrodinámica y eléctrica permite conocer la eficiencia y el ritmo de producción de diferentes

dispositivos diseñados para funcionar en el mar ya sea sobre la costa, en aguas de transición o en aguas profundas. Se realiza una clasificación y descripción exhaustiva de los dispositivos existentes en el campo de la energía del oleaje.

La energía que proporciona una planta undimotriz es variable en el tiempo y puede alcanzar diferencias significantes incluso entre una ola y la que le sucede, por este motivo la electricidad generada se utiliza para producir hidrógeno a través del proceso de electrólisis el cual diversifica la utilidad de la planta en diversas aplicaciones cotidianas que realizan un consumo energético.

Se desarrolla un caso de aplicación mediante la construcción de la matriz de potencia mediante la aplicación del procedimiento matemático que simula en comportamiento lineal de la Columna Oscilante de Agua.

Palabras Clave

Energía, ola, mar, océano, WEC, Columna Oscilante de Agua

Introducción	1
Resumen.....	4
1. Teoría de oleaje.....	7
1.1. Metodologías de estimación de energía undimotriz.....	7
1.1.1. Energía potencial.....	8
1.1.2. Energía cinética	11
1.2. Potencia del oleaje.....	12
1.3. Base de datos de oleaje	16
1.4. Cálculo de la energía undimotriz en el litoral mexicano	18
2. Tecnología para el aprovechamiento de la energía undimotriz.....	20
2.1. Clasificación de la tecnología de Energía de Oleaje.....	20
2.1.1. Clasificación por tipo de funcionamiento	22
2.1.1.1. Atenuador	22
2.1.1.2. Punto de absorción.....	23
2.1.1.3. Dispositivo activado por la presión dinámica del oleaje..	25
2.1.1.4. Articulación acelerada por olas	26
2.1.1.5. Columna Oscilante de Agua	28
2.1.1.6. Dispositivos de Rebase.....	29

2.1.2.	Clasificación por sitio de colocación	31
2.1.2.1.	Dispositivos sobre la costa.....	31
2.1.2.2.	Dispositivos próximos a la costa.....	33
2.1.2.3.	Dispositivos de aguas profundas	33
3.	Métodos de almacenamiento de energía.....	34
3.1.	Celdas de Combustible en la Ingeniería Marítima.....	34
3.1.1.	Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEFC) 40	
3.1.2.	Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC).....	45
3.1.3.	Celda de Combustible Alcalina (AFC)	50
3.2.	Sistema integral de energía de oleaje	54
4.	Estudio del funcionamiento de una Columna Oscilante de agua ...	56
4.1.1.	Teoría de la columna oscilante de agua	57
4.2.	Descripción de la Columna oscilante de agua	61
4.3.	Caso de estudio: Manzanillo Colima	66
	Conclusiones	70
	Bibliografía	73
	Páginas electrónicas de referencia	77

INTRODUCCIÓN

Históricamente, México ha sido un país eminentemente petrolero. Anualmente, el Balance Nacional de Energía, muestra la evolución del Sector Energético mediante el análisis de sus principales variables. En él se establece que la gran mayoría de la producción de energía primaria se da mediante el consumo de hidrocarburos como el petróleo, gas natural y condensados, y se espera que esta tendencia se mantenga por algunos años más.

En relación con uno de los sectores fundamentales en el desarrollo del país, el de la generación de energía eléctrica, históricamente se encuentran los hidrocarburos como la principal fuente de energía primaria. Actualmente, las energías renovables empiezan a tener un buen grado de integración; especialmente con la aprobación de la Reforma Energética de 2013.

De acuerdo a la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), México establece como meta “una participación máxima del 65% de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica para el año 2024, del 60% en 2035 y del 50 por ciento en 2050” y se debe incluir el aumento en la demanda energética en el país que aumenta a una tasa del 3.5% de acuerdo a la información de la Secretaría de Energía.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

Junto con el aumento de la demanda de energía, han ocurrido otros fenómenos; como el incremento de la preocupación por el medio ambiente, en particular por el cambio climático global, y el aumento en el consumo de energía eléctrica, tanto individual como industrial. Respecto al primer aspecto, la principal herramienta de mitigación para el cambio climático global es el Protocolo de Kioto, cuyo objetivo es reducir las emisiones de seis gases invernadero, entre ellos, el dióxido de carbono (CO₂) y el gas metano (CH₄). El primer gas se asocia, entre otros, a la combustión de carbón y Diésel empleado en la generación termoeléctrica, el segundo a la descomposición de materia orgánica vegetal inundada por embalses de centrales hidroeléctricas, especialmente en áreas tropicales, donde la descomposición de la materia orgánica sumergida es más rápida que en aguas frías o templadas. Respecto al segundo punto, aun no hay consenso entre la ciudadanía, el Estado y los empresarios, aun cuando las cifras señalan que la principal fuente de contaminación atmosférica proviene de dicho sector. En este sentido, el incremento de la demanda energética y el Protocolo de Kioto han incentivado el desarrollo de las 4 Energías Renovables no Convencionales (ERNC), cuya principal virtud es generar nada o pocos gases de efecto invernadero, contribuyendo a la mitigación del cambio climático global. Entendiéndose por ERNC aquellas derivadas de generación geotérmica, eólica, solar, biomasa, pequeñas centrales hidroeléctricas y aquellas fuentes de energía provenientes de los mares;

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

“correspondiente a toda forma de energía mecánica producida por el movimiento de las mareas, de las olas y de las corrientes, así como la obtenida del gradiente térmico de los mares”.

El objetivo de esta tesis es detallar las características energéticas en la costa mexicana mediante un análisis matemático del oleaje aplicado al litoral nacional. Se da a conocer la tecnología que existe en materia de uso y aprovechamiento de la energía undimotriz, así mismo se propone un sistema de almacenamiento de energía con la producción de hidrógeno. Posteriormente se describe el procedimiento matemático que rige el comportamiento de una Columna oscilante de Agua ya que esta tecnología es la más desarrollada a nivel mundial y es la más antigua que se utiliza en materia del potencial del oleaje.

RESUMEN

En el primer capítulo del presente documento se describe el procedimiento matemático para conocer la dinámica del oleaje, así como la potencia que contiene un estado de mar, con este método es posible evaluar el estado energético del oleaje a partir de sus parámetros físicos tales como amplitud de onda, periodo y dirección.

En el capítulo dos se clasifica y describe la tecnología actual que se desarrolla en todo el mundo en materia de explotación de la energía del oleaje, la primera clasificación es función de la manera en que funciona cada tipo de aparato, así como sus ventajas y desventajas ante un estado de mar particular, en este apartado se describe el funcionamiento y los parámetros que se involucran durante la operación. La segunda clasificación es en función de la zona donde se instala el dispositivo la cual puede ser sobre la costa, en aguas someras o en aguas profundas.

El capítulo número tres detalla la manera en la que se almacena la energía. La primera etapa del almacenamiento es utilizar la electricidad producida para generar hidrógeno a partir del proceso de electrólisis, una vez producido el gas hidrógeno se almacena para ser utilizado en una celda de combustible la cual tiene aplicaciones de alta gama de variedad que va desde

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

alimentación eléctrica para casa e industria, producción de calor y en la industria del transporte sin emitir gases de efecto invernadero a la atmósfera.

El capítulo cuatro es un caso de aplicación del sistema de aprovechamiento de energía del oleaje mediante la elaboración de la Matriz de Potencia que describe el desempeño de la Columna Oscilante para una amplia gama de estados de mar.

**APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE
AGUA**

1. TEORÍA DE OLEAJE

1.1. METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ

El estado de mar es resultado de múltiples fuerzas actuando en aguas oceánicas, la presión atmosférica y las variaciones que ésta induce cuando gradientes de temperatura cambian la presión y densidad del aire, la posición del sol y la luna también desempeñan un papel importante en la dinámica del océano ya que es el astro mayor el que rige las intensidades del viento que al propagarse cerca de la superficie producen el fenómeno conocido como oleaje.

En el océano es posible identificar más de un tipo de ondas en propagación (Figura 1.1). Las olas generadas por viento se encuentran en un rango medio de la escala energética, la Ecuación 1.1 representa matemáticamente el total de energía que tiene un grupo de ondas de oleaje que es la suma de la energía potencial y cinética (Silva, 2005):

$$E = E_p + E_c \quad (1.1)$$

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

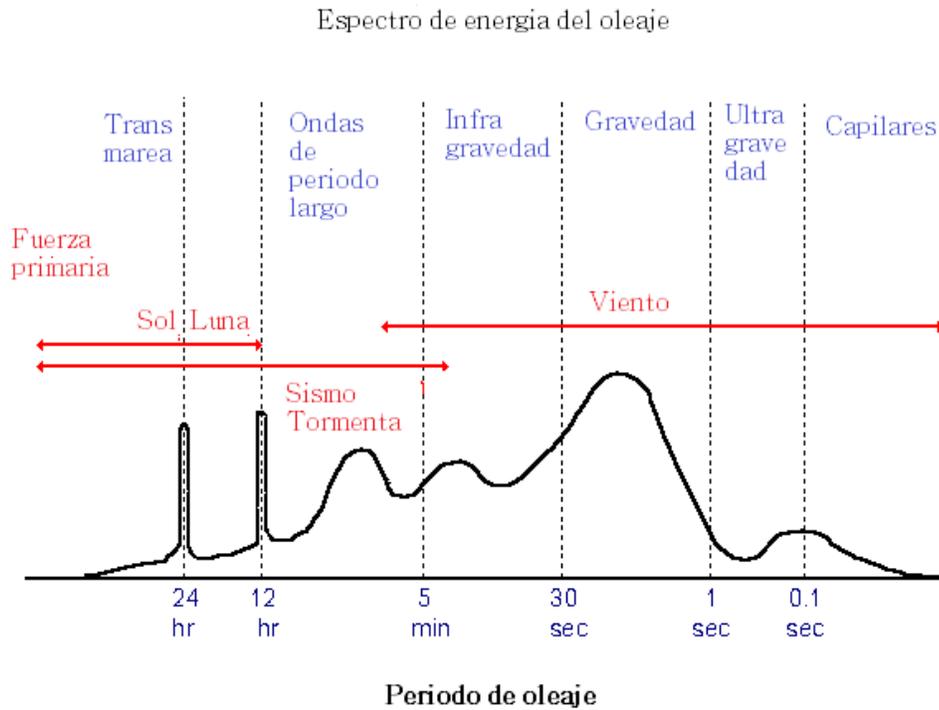


Figura 1.1 Frecuencia, energía y fuente del oleaje [37]

1.1.1. ENERGÍA POTENCIAL

La energía potencial de una ola se encuentra en función del desplazamiento vertical del agua, la masa de agua en movimiento y la densidad del agua, a partir del esquema de la Figura 1.2 donde p es la presión hidrostática, dx el ancho de la columna diferencial de agua, z es la cota del centro de masas y C.G. es el centro de gravedad de la columna diferencial de agua, el análisis físico la energía potencial se representa mediante el producto de la masa

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

contenida en la columna de agua por la distancia al centro de masas de la columna diferencial (Ecuación 1.2) que es el planteamiento teórico que permite evaluar la energía potencial del oleaje en función de parámetros físicos donde PE es la energía potencial, g es la fuerza de gravedad, z es la cota (Ecuación 1.3) y dm es el elemento diferencial de masa (Ecuación 1.4). Si la ecuación se integra en el dominio de x que es el eje paralelo al sentido de la dirección de propagación, se obtiene el total de la energía de cresta a cresta o del estado de mar representativo de las condiciones físicas dadas, la Ecuación 1.5 permite estimar la energía potencial del oleaje (Silva, 2005) donde ρ es la densidad del agua, H la altura de ola y η el desplazamiento vertical del agua.

$$d(PE) = dm g z \quad (1.2)$$

$$\bar{z} = \frac{h+\eta}{2} \quad (1.3)$$

$$dm = \rho(h + \eta)dx \quad (1.4)$$

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

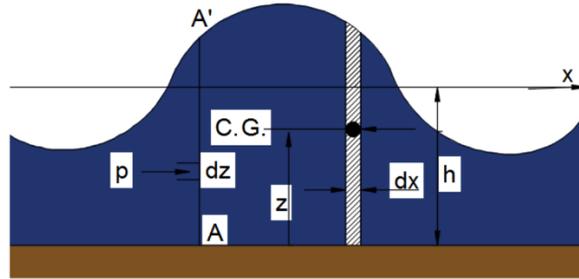


Figura 1.2 Análisis de energía del oleaje

$$(\bar{P}\bar{E})_T = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} d(PE) = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \rho g \frac{(h+\eta)^2}{2} dx = \frac{\rho g}{L} \int_x^{x+L} \frac{(h^2 + 2\eta h + \eta^2)}{2} dx$$

$$(\bar{P}\bar{E})_T = \frac{\rho g}{L} \left(\frac{1}{2} h^2 L + h \int_x^{x+L} \eta dx + \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \eta^2 dx \right) = \rho g \frac{h^2}{2} + \rho g \frac{H^2}{16}$$

$$\bar{P}\bar{E} = (\bar{P}\bar{E})_{oleaje} = \rho g \frac{H^2}{16} \tag{1.5}$$

Donde:

L longitud de onda

ρ densidad del agua

h profundidad a partir del espejo de agua

x eje paralelo a la dirección de propagación del oleaje

CG centro de gravedad de la columna de agua

1.1.2. ENERGÍA CINÉTICA

La propagación del oleaje produce un desplazamiento radial del agua, es posible conocer la energía cinemática para una sección diferencial del fluido la cual es la suma del cuadrado de la velocidad en dirección de los ejes coordenados en dos direcciones que corresponden al plano que contiene el espejo de agua si este se encontrase estático (normal al eje vertical) multiplicado por la masa del mismo. Lo anterior se puede estimar mediante la Ecuación 1.6 donde KE es la energía cinética, u y v velocidad de propagación del oleaje en el eje x y y respectivamente.

$$d(KE) = dm \frac{u^2 + v^2}{2} = \rho dx dz \frac{u^2 + v^2}{2} \quad (1.6)$$

Es necesario integrar la ecuación de energía cinética en dos direcciones para conocer la energía media de la ola que se propaga (Ecuación 1.7) donde λ es la longitud de onda, ρ densidad y g el valor de la gravedad. La suma de energía potencial más cinética es total que contiene una ola, de aquí en

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

adelante se hará referencia a este valor mediante el término energía neta (Ecuación 1.8).

$$KE = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u^2 + v^2}{2} dx dz$$

$$KE = \frac{\rho}{2L} \left(\frac{gHk}{2\sigma} \frac{1}{\cosh kh} \right)^2 \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} [\cosh^2 k(h+z) \cos^2(kx - \sigma t) + \sinh^2 k(h+z) \sin^2(kx - \sigma t)] dz dx$$

$$KE = \frac{1}{16} \rho g H^2 \tag{1.7}$$

$$E = KE + PE = \frac{1}{8} \rho g H^2 \tag{1.8}$$

1.2. POTENCIA DEL OLAJE

La potencia del oleaje se analiza con la teoría de oleaje real (Fernandez, 2010) cuyo planteamiento se basa en la descripción del espectro direccional completo del estado de mar que incluye la función de densidad de probabilidad de la distribución del espectro de energía $S(w,\theta)$ y la celeridad de grupo $C_g(w,\theta)$ integrado para un estado de mar (Ecuación 1.9)

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

$$N_L = \gamma \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g(\omega, \theta) S(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (1.9)$$

El análisis para aguas profundas ($h > \frac{\lambda}{2}$) se realiza mediante el momento espectral de orden cero del oleaje

$$\begin{aligned} N_L &= \gamma \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{g}{4\pi\omega} S(\omega, \theta) d\omega d\theta = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{S(\omega, \theta)}{\omega} d\omega d\theta \\ &= \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{(0)} T_p = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{(0)} \frac{2\pi}{\omega} \end{aligned}$$

El momento espectral de orden n ($m_{(n)}$) de la distribución de energía direccional de las olas se define como:

$$m_{(n)} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega, \theta) d\omega d\theta$$

Manteniendo constante la dirección e integrando únicamente en el rango de las frecuencias se llega a una definición más simple del momento espectral,

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

lo anterior se realiza al considerar el análisis en toda la longitud de onda (Fernandez, 2010).

$$m_{(n)} = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega$$

Por lo anterior la ecuación que representa la potencia del oleaje adquiere la forma:

$$N_L = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{S(\omega, \theta)}{\omega} d\omega = \left| \int_0^{\infty} \frac{S(\omega, \theta)}{\omega} d\omega = m_{(-1)} \right| = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{(-1)}$$

Si la altura de ola tiene una distribución tipo Rayleigh (Fernandez, 2010) entonces dichas variables independientes poseen la ecuación que está en función de los momentos espectrales de orden uno negativo y cero.

$$H_s = 4\sqrt{m_{(0)}} \qquad T_E = \frac{m_{(-1)}}{m_{(0)}}$$

Aplicando las leyes del álgebra a las ecuaciones de H_s y T_E en función del momento espectral de orden cero se llega a la definición de

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

$$m_{(-1)} = T_E m_{(0)} = T_E \frac{H_S^2}{16}$$

Para aguas profundas se tiene el valor de la celeridad $C_g = \frac{g}{4\pi\omega}$ por lo que la ecuación de potencia queda expresada en la Ecuación 1.10 en función a los parámetros físicos del oleaje

$$N_L = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{(-1)} = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{(0)} T_E = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_S^2 T_E \quad (1.10)$$

Al evaluar las constantes y sustituir el valor $T_E = 0.8572T_P$ se obtiene la ecuación corta para la potencia del oleaje

$$N_L = 0.423 H_S^2 T_P \quad \frac{kW}{m} \quad (1.11)$$

Existen diversas propuestas que utilizan los parámetros de altura de ola significativa y periodo pico para obtener la densidad de energía del oleaje, Pierson-Moskowitz [38] utiliza el término $H_{(1/3)}$ y $T_{m(0,2)}$ como se muestra en la Ecuación 1.12 que permite analizar las posibles combinaciones de altura y periodo mediante la Figura 1.3 que relaciona la potencia con los parámetros del estado de mar en un amplio rango.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

$$N_L = 0.549H_{(1/3)}^2 T_{m(0,2)} = 0.549H_s^2 T_z \quad \frac{kW}{m} \quad (1.12)$$

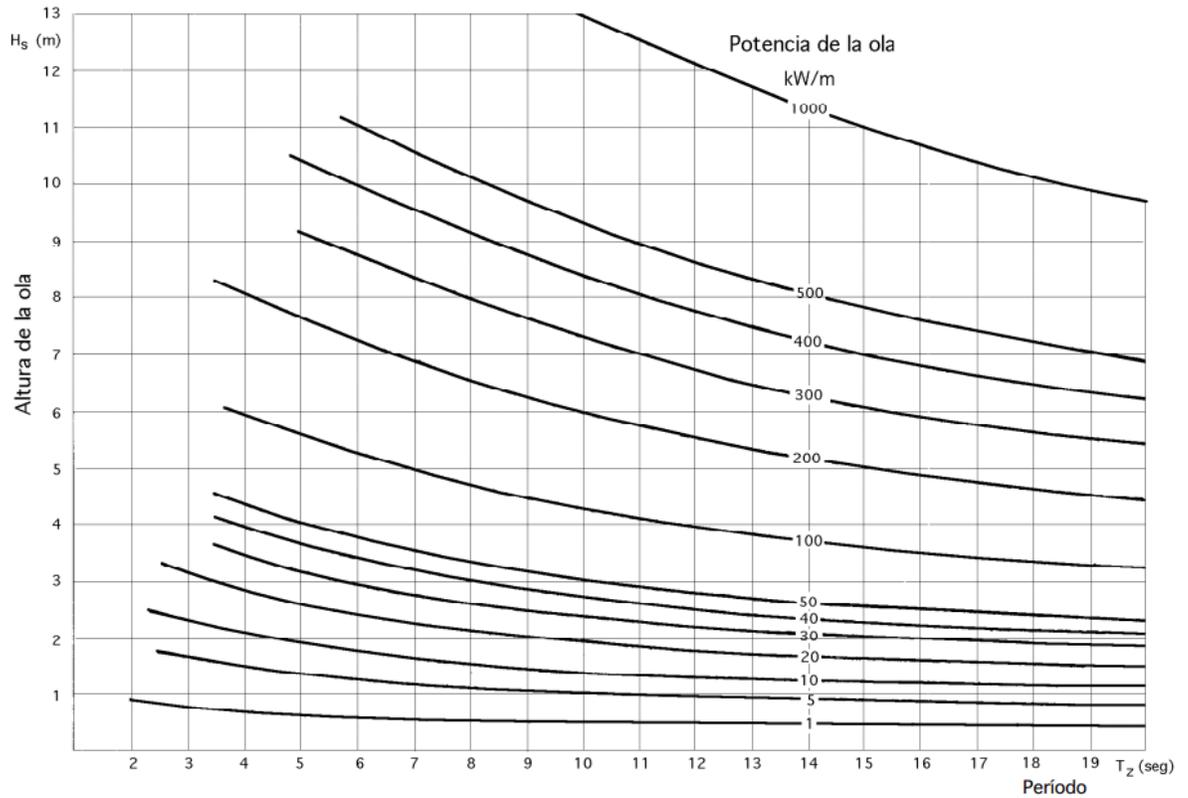


Figura 1.3 Potencia en kW/m de acuerdo a la propuesta de Pierson-Moskowitz

1.3. BASE DE DATOS DE OLEAJE

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

Actualmente existen bases de datos que contienen información sustancial del oleaje en el litoral mexicano. Para el estudio del potencial energético se hace uso de la base de datos elaborada en el Instituto de Ingeniería (Ruiz, 2009), la información disponible cuenta con registros en intervalos de una hora con fecha de inicio en el año 1948 y concluye en el 2007 con un total de sesenta años de datos de oleaje. La metodología utilizada para generar la información tiene bases en el modelaje híbrido de generación de oleaje el cual acopla el modelo de tercera generación WAM *Cycle* (Ruiz, 2009) que se usa para estimar el oleaje en aguas profundas para condiciones medias y del modelo de segunda generación HURAC (Ruiz, 2009) que se utiliza para estimar las condiciones de oleaje y viento en presencia de huracanes. El análisis abarca las dos vertientes del mar mexicano, en el pacífico las latitudes 12.5°N y 33.5°N y la longitud 90.5°W a 119.5°W con discretización espacial de 0.25° x 0.25°, en la vertiente atlántica el rango de latitud inicia en 15° N y finaliza en 31°N, la longitud va del 80°W para llegar a 98° W con la misma discretización espacial (Ruiz, 2009).

La información generada se valida mediante los registros realizados en el Golfo de México y Mar Caribe por las boyas 42056, 42001, 42002, 42036, 42040 y 42055 pertenecientes al *National Data Buoy Center*, los coeficientes de determinación entre las boyas y los datos generados con el modelo son 0.94, 0.88, 0.83, 0.84, 0.89 y 0.88 (Ruiz, 2009). El uso de bases de datos

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

generados a partir de registros de viento tiene la ventaja de contener series de información constante en el tiempo.

1.4. CÁLCULO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN EL LITORAL MEXICANO

La dinámica del mar varía con el tiempo y estas variaciones se presentan en periodos de tiempo relativamente cortos, es posible mediante métodos estadísticos conocer la disponibilidad energética a lo largo de las costas mexicanas (Pérez, 2013) y generar un atlas de potencial energético de las olas para el litoral mexicano, la Figura 1.4 muestra la potencia correspondiente a la altura de ola media que se destaca por su alta disponibilidad energética las zonas de la Península de Yucatán donde cuenta con valores entre 7-9 kW/m, la parte alta del Golfo de México cerca de las costas de Tamaulipas el potencial ronda entre 5-7 kW/m y el Pacífico de la Península de Baja California con valores alrededor de 6 kW/m, la zona con el menor potencial es el área circundante al Golfo de Tehuantepec con intervalos de energía de entre 0.5 y 2 kW/m (Pérez, 2013).

La escala que se maneja (nivel nacional) es un primer acercamiento a la potencia de las olas que ya permite conocer las zonas del país con mayor energía de oleaje disponible que son los mejores sitios para aprovechar la

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

energía de las olas, cabe resaltar que este es un valor medio del potencial undimotriz que se encuentra en constante cambio y presenta variaciones de energía incluso en lapsos de tiempo de algunos segundos por lo que el mapa solo indica un valor representativo de la distribución de potenciales de oleaje.

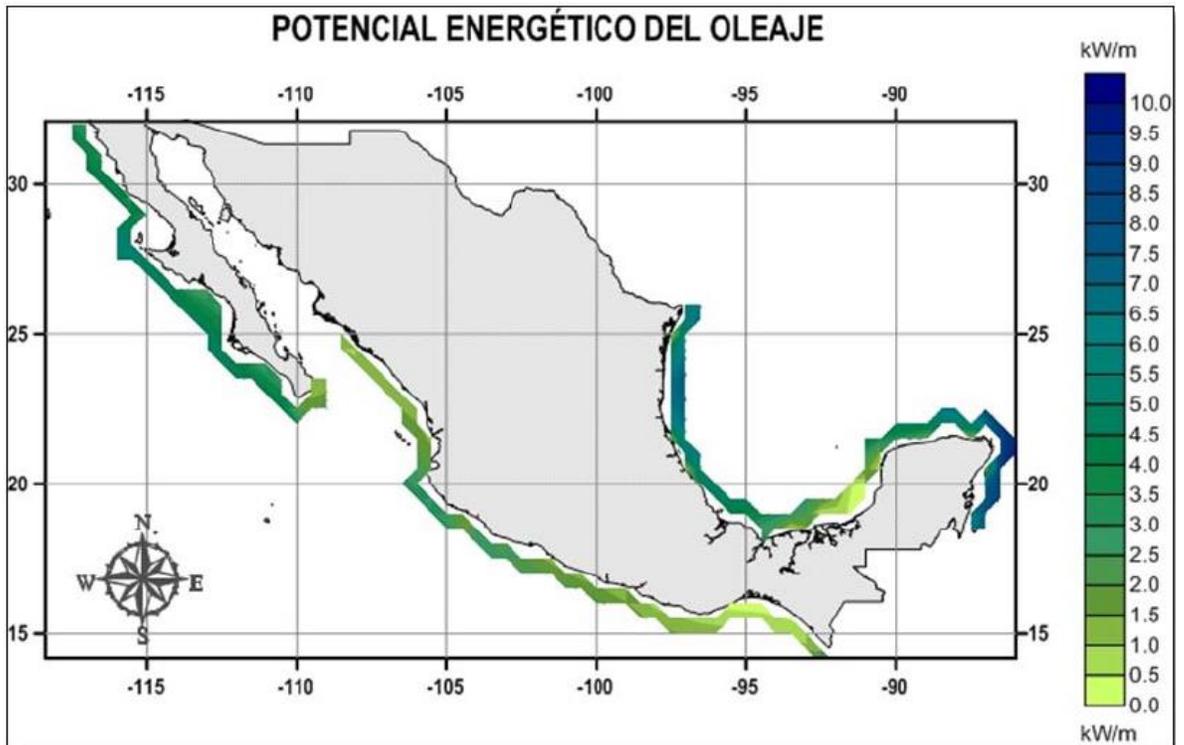


Figura 1.4 Potencial de oleaje en el litoral mexicano incluyendo las tormentas [(Pérez,2013)

2. TECNOLOGÍA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ

2.1. CLASIFICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE ENERGÍA DE OLEAJE

La idealización de sistemas de conversión de energía undimotriz resulta en una amplia variedad de métodos que permiten extraer energía de las olas, la Figura 2.1 ilustra los principios físicos más comunes con los que se convierte la energía dinámica del oleaje en potencial mecánico el cual se utiliza para mover el generador eléctrico por inducción. Es importante resaltar el papel que tiene la eficiencia de cada uno de estos procesos de conversión de energía a la hora de evaluar la efectividad de cada uno de los métodos de conversión de energía de oleaje.

Los métodos expuestos constituyen la base en el desarrollo de la tecnología disponible para la conversión del oleaje. En los próximos subtemas se clasifica la tecnología disponible en todo el mundo y que ha sido probada a escala real (1:1) lo que permite hacer un análisis en un estado de mar real del funcionamiento asociando los parámetros físicos del estado de mar (altura de ola, periodo y dirección si es el caso) con una producción de electricidad, la finalidad de este capítulo es conocer a detalle la tecnología utilizada para convertir la energía del oleaje

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

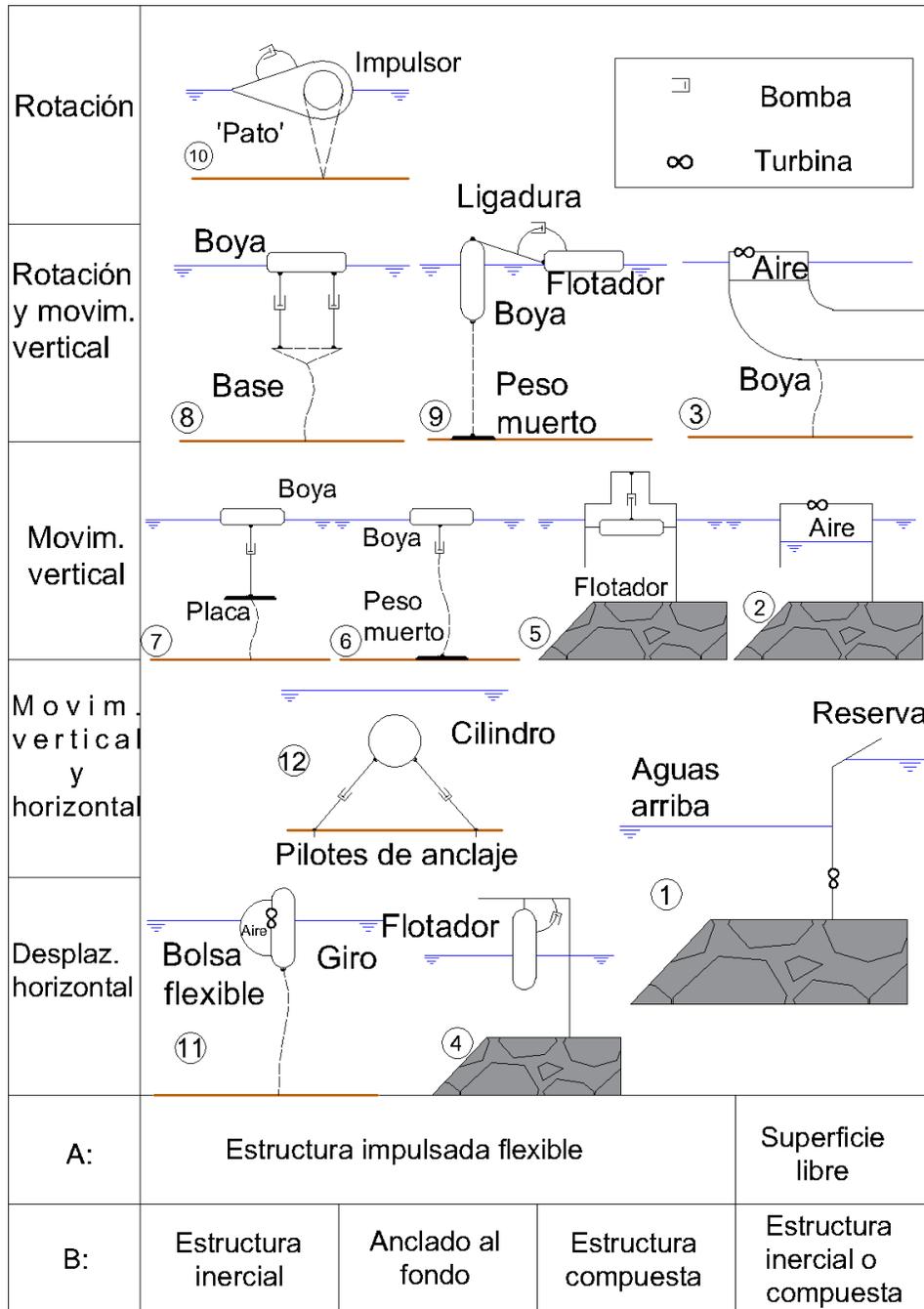


Figura 2.1 Mecanismos de conversión energéticos de las ondas oceánicas

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

2.1.1. CLASIFICACIÓN POR TIPO DE FUNCIONAMIENTO

2.1.1.1. ATENUADOR

Un dispositivo atenuador consiste en dos o más secciones cilíndricas unidas por medio de una junta flexible la cual permite el movimiento relativo entre las secciones cilíndricas con el paso de las olas, este movimiento relativo mueve un sistema interno del atenuador que genera energía eléctrica (Figura 2.2). Este sistema permite generar 750 kW en estados de mar muy energéticos donde alcanza su máxima eficiencia que se asocia a la sección óptima de diseño, geometría óptima de cada sección, número de secciones y diámetro efectivo más eficiente (Backer, 2009).

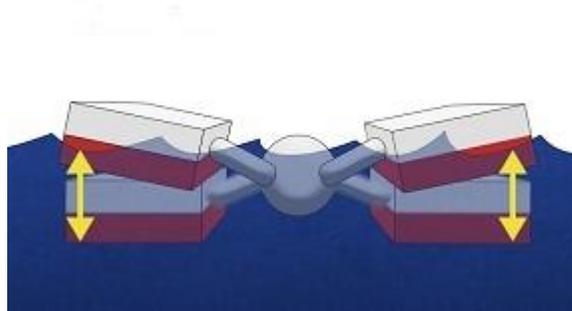


Figura 2.2 Dispositivo atenuador con juntas universales

La potencia que genera el atenuador está en función de la geometría del mismo y del estado de mar, con la Ecuación 2.1 se calcula la energía por unidad de tiempo que atraviesa el sistema hidráulico de producción eléctrica

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

que es el producto de la frecuencia angular y el momento inducido entre dos secciones (Backer, 2009).

$$P_n = \frac{\omega^2}{2} \sum_{n=2}^n \left[\tilde{\alpha}_n \left(\frac{2B_{n-1}}{L_{n-1}} - \frac{2B_n}{L_n} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

donde:

- $\tilde{\alpha}_n$ es la tasa de extracción entre los cilindros
- B_n base de la sección
- L_n longitud del cilindro

2.1.1.2. PUNTO DE ABSORCIÓN

El punto de absorción consiste en una boya que oscila con el paso del oleaje lo que acciona un mecanismo de transmisión de energía hacia el generador de inducción. Esta tecnología se diseña para operar en arreglos de dos o más boyas que se conoce como bloque.

La flotabilidad de la boya consiste en un mecanismo fuerza-disipación-equilibrio (Figura 2.3) donde el movimiento de la boya se restringe al desplazamiento vertical que se rige por la segunda ley de Newton mediante el equilibrio dinámico de las fuerzas actuantes (Backer, 2009) lo cual se conoce como *ecuación de movimiento* del punto de absorción como se muestra en la Ecuación 2.2 donde F_{ex} es la fuerza de excitación del oleaje, F_{rad} es la fuerza radiada, F_{res} fuerza de restauración hidrostática, F_{damp} y F_{tun}

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

son fuerzas que dependen del sistema de producción eléctrica y del mecanismo de control.

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = F_{ex} + F_{rad} + F_{res} + F_{damp} + F_{tun} \quad (2.2)$$

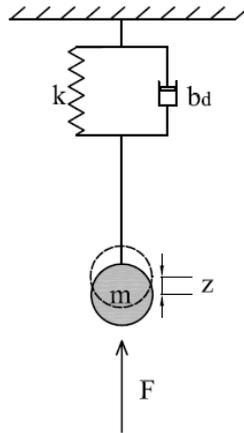


Figura 2.3 Diagrama de cuerpo libre del punto de absorción del tipo fuerza-disipación-equilibrio donde kz es la fuerza de equilibrio, b_d fuerza irradiada o disipada, la masa m en movimiento es el impulso y F la fuerza del oleaje que actúa en la boya.

Cuando se asume una boya en movimiento armónico oscilante y la potencia absorbida en un periodo igual a la diferencia de la potencia de excitación menos la fuerza radiada entonces el promedio de la potencia absorbida se representa con la Ecuación 2.3 donde b_{ext} es el coeficiente de extracción, ω

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

la frecuencia angular y z_A la amplitud del movimiento oscilatorio en estado estable (Backer, 2009).

$$P_{abs} = \frac{1}{2} b_{ext} \omega^2 z_A^2 \quad (2.3)$$

2.1.1.3. DISPOSITIVO ACTIVADO POR LA PRESIÓN DINÁMICA DEL OLEAJE

El principio físico que rige esta tecnología es la presión dinámica sobre el fondo marino que induce el paso del oleaje, cuando la fase de una ola está en el punto máximo (cresta) aumenta la presión en el fondo y en el momento en que se encuentra en la fase de valle la presión hidráulica disminuye generando así una presión dinámica diferencial (Drew, 2009), mecanismo que se desarrolla a partir de la disipación de energía en fondos marinos turbios con elevado dinamismo (Lehmann, 2014).

Se considera un fluido homogéneo, no viscoso e incompresible con movimiento irrotacional, el fondo a la profundidad $z=-h$ visco elástico, la energía absorbida por el dispositivo sumergido se presenta en la Ecuación 2.4 donde a_{s0} es la amplitud en la superficie y A_c es el área horizontal de la superficie (Lehmann, 2014).

$$E_c = \frac{1}{2} \rho g a_{s0}^2 \varepsilon A_c \quad (2.4)$$

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

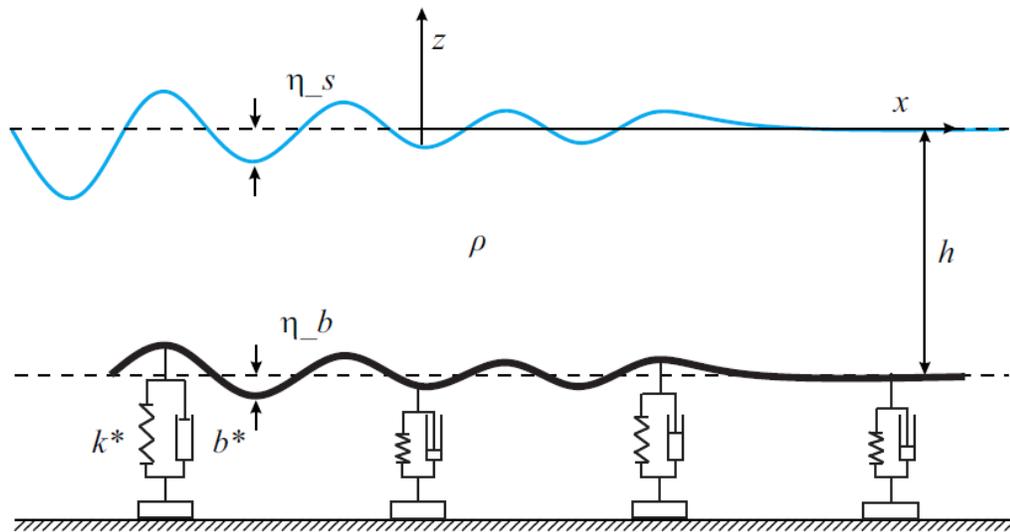


Figura 2.4 Mecanismo de extracción de energía dinámica sumergida que extrae energía de las ondas superficiales, el sistema se compone de resortes lineales con coeficiente de rigidez k^* que actúa como fuerza restauradora, los generadores se representan mediante el factor de amortiguamiento b^* que extrae energía del oleaje. La distancia entre cada módulo se considera varias veces menor que la longitud de onda típica del oleaje.

2.1.1.4. ARTICULACIÓN ACELERADA POR OLAS

El concepto original de la articulación acelerada por olas es una placa sostenida por un perno con los grados de libertad suficientes para rotar en sentido del eje paralelo a la cresta de la onda superficial, así mismo consta de un talud posterior a la placa (Figura 2.5). El comportamiento del AAO se analiza bajo la premisa del uso de una placa relativamente esbelta y con desplazamiento en el plano horizontal. De manera general se considera una

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

rotación con anclaje en el fondo marino ya que el máximo desplazamiento de las partículas de agua se presenta en la superficie, sin embargo, cuando el AAO se instala en aguas someras el movimiento horizontal en el fondo es considerable por tal motivo puede conviene analizar un anclaje por encima de la superficie del agua. Colocar la bisagra por encima del nivel del agua tiene dos ventajas más: el sistema de producción eléctrica es más accesible y el giro de la placa no se restringe y puede girar 360°.

El muro posterior del AAO se requiere para obtener parámetros del funcionamiento del mismo, el primero es el volumen de agua de la columna entre la placa y el muro que influencia la calibración del equipo, reduce la turbulencia convirtiéndose en movimiento de vertical del agua y controla el desplazamiento de la placa ocasionado por el agua corriendo por detrás de la placa y tiende a mover la placa al fondo marino (Folley, 2004)

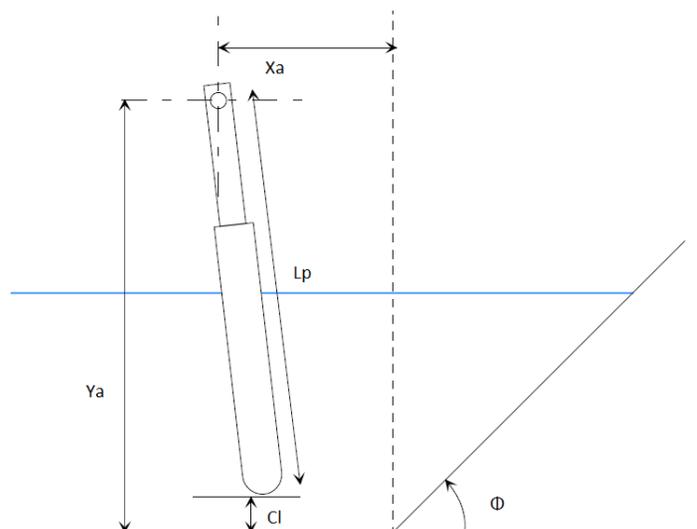


Figura 2.5 Diagrama de una articulación acelerada por olas

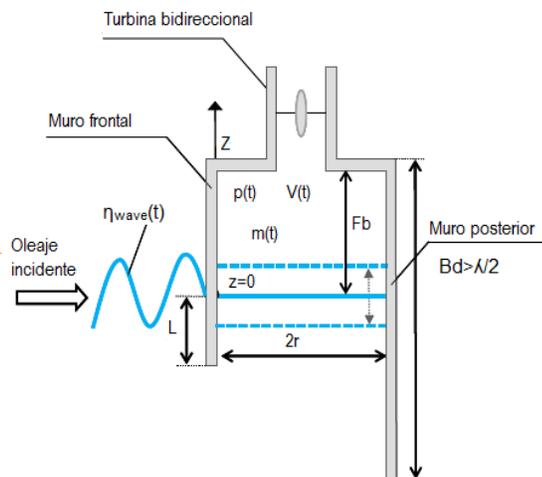
APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

El desempeño del AAO se mide a través del factor de captura de energía (C_F) que se defina como la proporción de energía absorbida por unidad de longitud con la energía contenida por unidad de ancho de cresta (Sarkar, 2016).

$$C_F = \frac{P_{opt}}{\frac{1}{2}C_g A_1^2} \quad (2.5)$$

2.1.1.5. COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

La columna Oscilante de Agua (COA) consiste en un cilindro de pistón bajo la acción de olas unidireccionales propagándose a profundidad constante (Figura 2.6) donde $p(t)$ es la presión del aire dentro de la cámara, $V(t)$ es el volumen de aire y $m(t)$ la masa de aire contenida en la cámara del COA.



APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

Figura 2.6 Diagrama del COA con variables involucradas en el performance

2.1.1.6. DISPOSITIVOS DE REBASE

La teoría lineal de rebase considera el agua oscilando en la rampa del dispositivo, el borde de la rampa es un sistema de toma de energía altamente no lineal, estas no linealidades hacen un sistema con mucha demanda de recursos computacionales, por tal motivo se aplica un modelo físico adimensional.

En función del estado de mar (H_s , T_p) y de la cresta libre del aparato, el agua rebasa la estructura de la rampa que genera un gasto (Q_{overtop}) que pasa por encima de la cresta y se conduce al embalse. La energía producida se encuentra en función del producto del gasto de rebase, la altura de cresta de la rampa y la gravedad. La energía hidráulica utilizable mediante una o varias turbinas es función del caudal turbinado (Q_{turb}), sección de la turbina, densidad del agua y la gravedad.

En la ingeniería marítima existe el estudio del gasto de rebase, la teoría de Van der Meer y Janssen (1994) proporciona la base para el caudal medio esperado de rebase en función de la geometría del dispositivo y del estado de mar, si bien esta teoría busca minimizar el caudal e rebase, mediante el desempeño de estructura de rampa con distinto ángulo de inclinación, altura de cresta y variación del estado de mar se conoce las condiciones que

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

propician un alto caudal que pasa hacia el almacén. La Ecuación 2.7 es el modelo de rebase donde a y b son coeficientes experimentales, R francobordo adimensional, la Ecuación 2.8 estima el gasto adimensional sobre la estructura y en la Ecuación 2.9 se calcula el francobordo adimensional (Mendoza, 2015). Lo anterior es válido para número de Iribarren menor de dos.

$$Q = ae^{-(bR)} \quad (2.7)$$

$$Q_{ND} = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \sqrt{\frac{S_{op}}{\tan \alpha}} \quad (2.8)$$

$$F_d = \frac{R_c}{H_s} \frac{\sqrt{S_{op}}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} \quad (2.9)$$

Los coeficientes a y b se conocen como coeficientes de ajuste, esta teoría abarca taludes rectos y con berma ensayados por van der Meer y Janssen.

$$I_{r_p} < 2$$

$$a = 0.06, \quad b = 5.2 \quad \text{con} \quad 0.3 < \frac{R_c \sqrt{S_{om}}}{H_s \tan \alpha} \frac{1}{\gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} < 2$$

$$I_{r_p} \geq 2$$

$$a = 0.2, \quad b = 2.6$$

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

Cada factor γ representa un parámetro físico y en conjunto define las características geométricas del dispositivo de desbordamiento.

$\gamma_r=1$ para rampa lisa

$\gamma_b=1$ en condiciones de superficie recta

$\gamma_h=1$ oleaje con distribución Rayleigh

$$\gamma_\beta = \begin{cases} 1.0 & \text{para } 0^\circ \leq \beta \leq 10^\circ \\ \cos(\beta - 10^\circ) & \text{para } 10^\circ \leq \beta \leq 50^\circ \\ 0.6 & \text{para } \beta > 50^\circ \end{cases}$$

Para conocer la eficiencia del rebase se utiliza el gasto adimensional, este parámetro involucra parámetros físicos del modelo y del estado de mar por lo que permite conocer el desempeño del dispositivo al variar sus propiedades geométricas (Bevilacqua, 2012).

2.1.2. CLASIFICACIÓN POR SITIO DE COLOCACIÓN

2.1.2.1. DISPOSITIVOS SOBRE LA COSTA

Actualmente existen métodos para distinguir entre aguas someras, intermedias y profundas en función de la hidrodinámica oceánica y al aspecto

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

geológico de cada lugar. Los WEC's que son colocados cerca de la costa tienen la ventaja de ubicarse en las zonas próximas de consumo de energía como ciudades y zonas industriales por lo que se disminuyen los costos y pérdidas energéticas por transporte a tierra firme. Ante esta ventaja se presenta la problemática de que las olas que se propagan cerca de la costa ya han disipado energía debido la fricción en el lecho marino.

En esta categoría se encuentran los puntos de absorción de energía, rebase no flotante como el Slot-Cone Generator el cual se acopla muy bien a playas rocosas o en acantilados donde las aguas son poco profundas (ver Figura 2.13).



Figura 2.13 Representación artística de un dispositivo de rebase acoplado a un rompe olas

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

2.1.2.2. DISPOSITIVOS PRÓXIMOS A LA COSTA

A esta categoría pertenece cualquier conversor que se instala a una distancia menor a un cuarto de longitud de onda del estado de mar representativo de la zona, por tal motivo se trata de tecnología anclada directamente al fondo marino.

2.1.2.3. DISPOSITIVOS DE AGUAS PROFUNDAS

Un dispositivo costa afuera se construye en aguas profundas pudiéndose tratar de varias decenas de metros, también existe el criterio que trata una profundidad superior a un tercio de la longitud de onda. La ventaja de colocar un WEC en aguas profundas es la dinámica más intensa puede generar una mayor cantidad de energía debido al elevado dinamismo hidrodinámico, sin embargo, los dispositivos *offshore* presentan la complicación de instalar a grandes distancias de la costa, mayor costo de mantenimiento por el estado energético elevado en aguas profundas y la necesidad de transportar la energía generada hacia la costa (Bevilacqua, 2012), el transporte induce pérdidas energéticas y económicas. Se debe realizarse un análisis específico para cada zona y equiparar las altas producciones de energías y los costos extras inducidos en las aguas profundas para encontrar la distancia máxima permisible a la que se pueden instalar conversores de energía del oleaje.

3. MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

3.1. CELDAS DE COMBUSTIBLE EN LA INGENIERÍA MARÍTIMA

Las celdas de combustible son dispositivos de producción eléctrica que mediante un proceso químico produce un intercambio de electrones debido a una reacción de tipo RedOx genera un potencial eléctrico, para realizar este proceso la celda requiere combustible o reactantes electroquímicos que para la celda es hidrógeno y oxígeno, el primero se obtiene de una fuente primaria de energía mediante electrólisis o como derivado del petróleo, el oxígeno se obtiene de la atmósfera.

La celda de hidrógeno puede funcionar de manera continua si el combustible se mantiene fluyendo ininterrumpidamente; la eficiencia de esta tecnología oscila entre el 40-60% si se libera el calor producido por la celda, cosa que casi siempre conviene si dicho calor se utiliza para calentar agua (Schatzlab. 2010). La Figura 3.1 contiene el diagrama básico de una pila de combustible (Irshad, 2016).

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

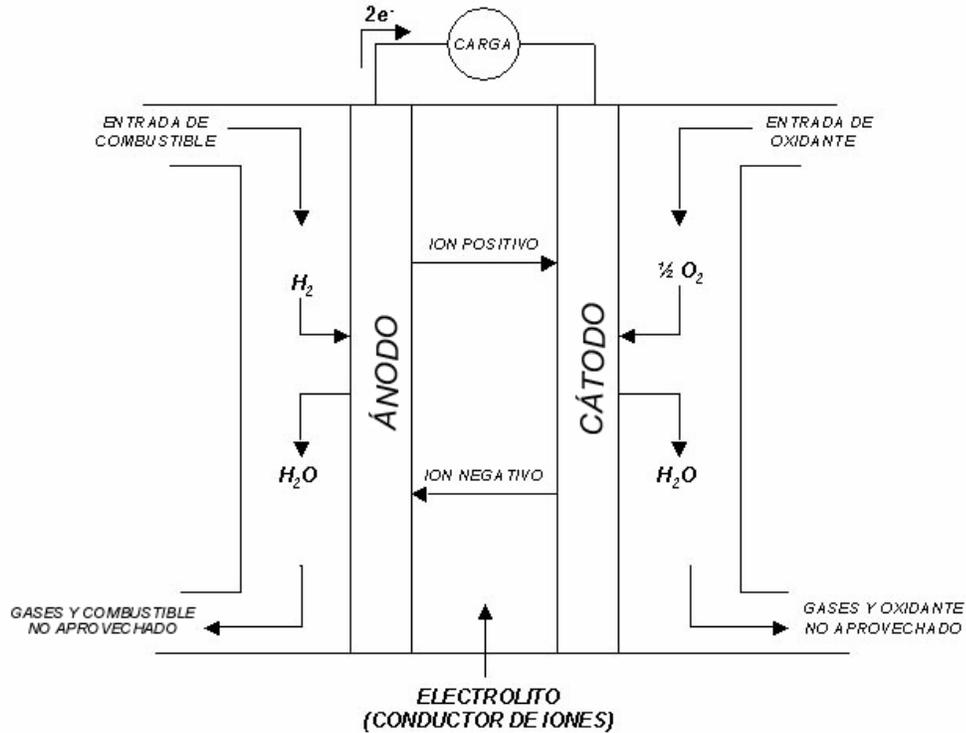


Figura 3.1 Esquema básico de una celda de combustible donde se muestran las entradas y salidas de la celda

De acuerdo con el principio químico que rige a la celda de combustible se obtiene un valor de la eficiencia efectiva (Tabla 3.1) que varía en función de la potencia eléctrica que produce (Irshad, 2016).

El combustible de la celda es el hidrógeno el cual puede suministrarse en forma pura con tolerancia del 20%-30% aunque la celda puede funcionar con cualquier mezcla que contenga hidrógeno como los hidrocarburos, sin embargo, se reduce la eficiencia y el proceso llega a tener un menor impacto positivo en la atmósfera (Irshad, 2016).

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

La potencia que desarrolla la celda de hidrógeno se determina mediante el potencial de Nernst (Tanni, 2013) que mediante la presión del hidrógeno, oxígeno y vapor de agua conoce la interacción entre el hidrógeno y oxígeno desde el punto de vista termodinámico (Ecuación 3.1). Las variables que intervienen son (E^0) que es el potencial que libera la reacción RedOx en condiciones estándar (1.229 V), $p'H_2, p'O_2, p'H_2O$ son la presión del hidrógeno, oxígeno y vapor de agua en atm, T es la temperatura de la celda en K, R la constante universal de los gases ($8.31441 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), F la constante de Faraday ($96484.56 \text{ C mol}^{-1}$) y n es el número de electrones que actúan o participan en la reacción.

$$E_{\text{nernst}} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{p'H_2(p'O_2)^{0.5}}{p'H_2O} \right] \quad (3.1)$$

Al potencial óptimo generado por la batería debe restársele las pérdidas que se ocurren debido a la disipación por activación del proceso electroquímico (V_{act}), pérdidas óhmicas que se producen en el transporte de iones en el electrolito (V_{ohmic}) y pérdida por dilución que la produce las impurezas en el hidrógeno que se diluye en el electrodo (V_{conc}).

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

$$V_{act} = \frac{-RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad (3.2)$$

$$V_{ohmic} = -IR_{int} \quad (3.3)$$

$$R_{int} = 0.0652I^{-0.819}$$

$$V_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (3.4)$$

Para conocer el potencial efectivo que produce la celda (V_{cel}) se elabora la diferencia entre la energía producida por la reacción electroquímica y la disipación, lo que se expresa en la Ecuación 3.5 que define el potencial eléctrico de salida real de la celda de hidrógeno.

$$V_{cel} = E_{nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \quad (3.5)$$

La eficiencia de la celda se puede expresar con la Ecuación 3.6

$$\eta_{cel} = \frac{V_{cel}}{E_{nernst}} \quad (3.6)$$

Para realizar el diseño de una celda de combustible es necesario conocer el potencial teórico al que debe trabajar la celda que es la demanda eléctrica y se conoce como tensión a circuito abierto (V_0), la tensión de celda (V_{cel}) es el potencial eléctrico que entrega una celda de hidrógeno característica y de

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

manera empírica se sabe que dicha potencia es 0.9 V y N es el número de celdas que deben conectarse en serie para obtener el voltaje requerido.

$$N = \frac{V_0}{V_{cel}} \quad (3.7)$$

La superficie activa de la membrana permite conocer el rendimiento de a celda, la potencia eléctrica que suministra la batería es directamente proporcional al número del celdas que la componen (Almarza, 2010), la ecuación 3.8 define intensidad mínima de la celda (I) para obtener la potencia nominal en amperes (se define la potencia nominal del sistema o demanda nominal ($W_0 = V_0 \cdot I$)):

$$I = \frac{W_0}{V_0} \quad (3.8)$$

Con el valor de la intensidad y bajo la premisa de utilizar platino como catalizador y que esta entrega una densidad de corriente del orden de 0.02 A/cm² (i_0) es posible conocer la superficie activa de la celda con la Ecuación 3.9

$$S_{tot} = \frac{I}{i_0} \quad (3.9)$$

Para conocer la superficie activa por membrana ($S_{membrana}$) es preciso dividir la superficie total S_{tot} entre el número de celdas que conforman la batería además se debe satisfacer la Ecuación 3.10.

$$S_{membrana} \geq \frac{I}{i_0} \quad (3.10)$$

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

A la fecha existe una variedad de celdas de combustible que varía una con otra en la composición de la membrana, electrolito y concentración del catalizador, presión y temperatura a la que operan y fundamentalmente existe variación en la cantidad de energía que produce la celda.

Celda de combustible	Temperatura de func. (°C)	Potencia (kW)	Eficiencia (%)	Uso y aplicación
Membrana de intercambio protónico (PEM)	60-110	0.01-250	40-55	Portátil, móvil, producción de baja densidad
Celda de combustible alcalina (AFC)	70-130	0.1-50	50-70	Móvil, espacial, militar.
Celda de ácido fosfórico (PAFC)	175-210	50-1000	40-45	Producción a mediana y gran escala, funciona con ciclo combinado
Celda de carbonato fundido (MCFC)	550-650	200-100,000	50-60	Producción a gran escala
Celda de óxido sólido (SOFC)	500-1000	0.5-2000	40-72	Vehículos, ciclo combinado, sistemas fuera de red.
Celda de metanol (DMFC)	70-130	0.001-100	40	Portátil y móvil

Tabla 3.1 Eficiencia de los distintos tipos de celdas de combustible (Currie, 2002)

Generalmente se utiliza un catalizador de platino cuya función es asociar las moléculas del combustible en dos iones de hidrógeno mediante la reacción de adsorción del platino con el hidrógeno, en este proceso libera dos electrones que se conducen mediante un circuito exterior a la celda y que alimenta la carga de salida, los protones atraviesan la membrana

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

polimérica hasta alcanzar el cátodo donde ocurre una reacción con el oxígeno y se genera vapor de agua.

3.1.1. CELDA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (PEFC)

Este tipo de celdas utiliza un electrolito en forma de polímero sólido que permite la conducción de protones a través de su lecho, esta propiedad le proporciona una baja corrosión lo que implica una larga vida útil (alrededor de 50,000 horas) y un costo de mantenimiento bajo. La temperatura de funcionamiento es baja por lo que su arranque es rápido alcanzando la mitad de la carga de diseño inmediatamente. Las celdas de intercambio protónico ofrecen un máximo de potencia entregada para celdas de otro tipo con el mismo volumen, peso y coste.

Los componentes de la pila de intercambio protónico y sus aditamentos se muestran en la Figura 3.2

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

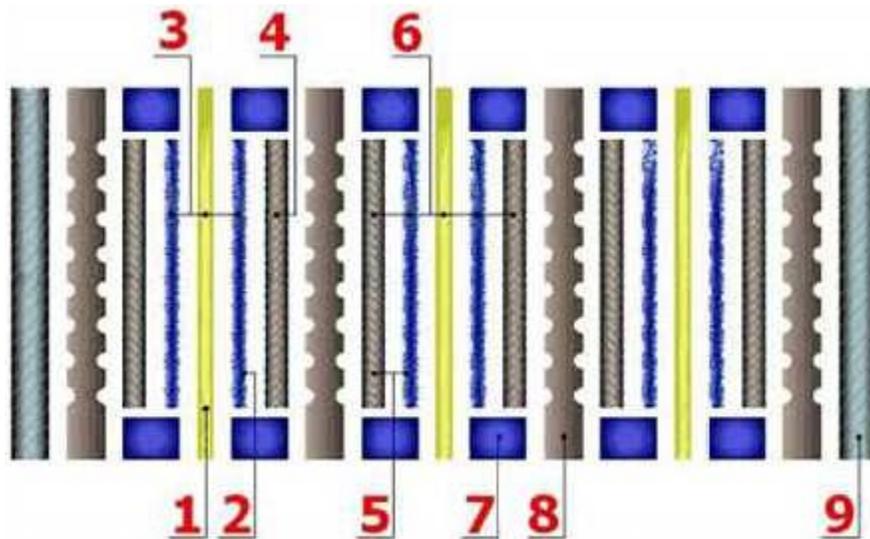


Figura 3.2 Componentes de una pila de combustible tipo PEM (Almarza, 2010)

- Membrana de intercambio de protones en estado sólido, es un electrolito polimérico de politetrafluoroetileno (PTFE) sulfonado comúnmente conocido como teflón que cuenta con propiedades impermeables que en sus extremos se coloca óxido de azufre (SO^3) que promueve la captura de protones, esta paca se encarga de permitir el paso únicamente a los protones hidrógeno H^+ .
- Capa activa o catalítica constituida por una capa fina de catalizador y un soporte físico de carbón, es en la superficie de la capa activa donde se produce la catálisis por tal razón debe estar cerca del electrolito para favorecer el transporte de iones.
- Membrana de catalizador de platino de 0.05 mg/cm^2 en el ánodo y 0.2 mg/cm^2 en el cátodo si se emplea como combustible H_2 y aire, si se

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

utiliza hidrógeno obtenido de la reformación catalítica del petróleo el catalizador más eficiente es de Pt/Ru en proporción 1:1.

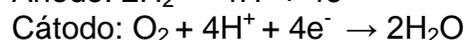
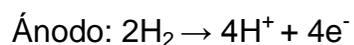
- Capa de difusión de gases compuesta de papel carbón, tiene la función de difundir homogéneamente los gases reactantes sobre el catalizador, mantener la humedad adecuada en la celda y reducir las pérdidas óhmicas. El espesor de esta capa es del orden de 100 μm a 300 μm con tamaño de poro inferior a los 60 μm ya que poros superiores favorecen la acumulación de gotas de agua que dificultan el transporte de masa, este es un motivo por el cual la capa de difusión recibe un tratamiento hidrofóbico a base de PTFE que mejora la evacuación del agua.
- Electrodo de difusión de gases forma parte de la capa de difusión de gases
- Ensamblaje electrodo membrana es la parte fundamental de la celda y lo constituye la membrana de intercambio protónico, catalizador y la capa de difusión de gas, todos los componentes se fabrican por separado y se compactan a altas presiones y temperaturas lo que resulta en un espesor menor a un milímetro [51].
- Junta o sello se colocan para garantizar el cierre de las celdas, se coloca entre la membrana y la placa colectora, aunque puede variar en función del diseño de la celda. Se fabrica de cualquier elemento

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

polímero elástico que soporte altas temperaturas y que sea inerte químicamente como la silicona.

- Placa bipolar construida de grafito permite el flujo de hidrógeno en una de sus caras y en la otra el paso del oxígeno, además estas placas actúan como separadores entre celdas cuando se agrupan varias de estas para producir altos voltajes. Es por medio de estas placas que se suministra el combustible y por donde se deshecha los productos de la reacción electroquímica. Su coste es de aproximadamente el 60% del costo total de la pila y su funcionamiento impacta directamente en la eficiencia con un peso del 80%. Se debe construir de un material altamente conductor, con elevada conductividad térmica, impermeable a los gases y con diseño que permita la adecuada distribución de gases sobre el catalizador.
- Placa terminal se fabrica con metacrilato de 10mm de espesor, se monta en los bordes externos de la pila, actúan como soporte que mantiene unida la estructura y resiste los esfuerzos generados. Permite la entrada y salida del hidrógeno y vapor de agua a través de conductos que atraviesan la placa (Almarza, 2010).

Las reacciones que ocurren dentro de la celda son:



APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

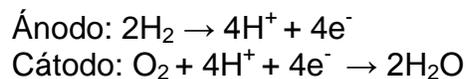
El valor teórico de la tensión de una celda a circuito abierto es de 1.25V, sin embargo, las mediciones hechas en celdas funcionando indican valores significativamente menores ya que existen pérdidas de energía que en electroquímica se conoce como polarización. Por tal motivo la tensión que produce este tipo de celdas es de 0.7 V.

Para reducir la polarización se recomienda aumentar al máximo la temperatura de funcionamiento sin reducir considerablemente la concentración de agua en la membrana protónica, mantener los niveles de reactivos en los niveles adecuados y disminuir al máximo el espesor de la membrana de intercambio (Almarza, 2010).

Este tipo de celdas operan entre 0° y 90° siendo el rango entre 60° y 80° la temperatura más eficiente, la densidad de corriente que [produce la celda de intercambio protónico es de 4 amps/cm² con una concentración de catalizador menor a 1 mg/cm², si se utiliza reformado de petróleo se obtienen valores de 50 mW/cm² a 0.7 V y si el combustible es hidrógeno la batería produce 400-600 mW/cm².

3.1.2. CELDA DE COMBUSTIBLE DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)

Esta celda es la primera en ser comercializada, opera en rangos de potencia entre 50 a 250 kW sin embargo las plantas más grandes de 1 MW y 5MW se han construido alrededor del mundo. Actualmente la concentración de platino se encuentra alrededor de 0.1 mg Pt/cm² en el ánodo y 0.5 mg Pt/cm² en el cátodo, la temperatura de operación oscila los 200 °C y concentración de H₃PO₄ del 100%, estas características de la celda de ácido fosfórico dan como resultado un voltaje aproximado de 0.8 V. La reacción que se lleva a cabo en el catalizador de cada electrodo es:



Para que la reacción ocurra los iones hidrógeno son transferidos desde el ánodo al cátodo a través del electrolito en la membrana y los electrones del ánodo al cátodo por vía circuito externo (Tulio, 2004). Las reacciones tanto en el ánodo como en el cátodo suceden en la llamada *capa de tres fases* donde se presenta la fase sólida de catalizador de platino, fase líquida de ácido fosfórico y gas en forma de hidrógeno y oxígeno. Para que la reacción electroquímica se lleve a cabo de manera eficiente, es necesario que la capa porosa de catalizador se fabrique de tal forma que permita el paso del gas y que el ácido penetre adecuadamente ofreciendo una superficie de contacto

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

suficiente sobre el catalizador. El catalizador se compone de carbón negro que da soporte al catalizador, catalizador de platino con alta dispersión y un agente hidrofóbico que generalmente se compone de PTFE.

Un *stack* de una pila de combustible de ácido fosfórico se compone de dos electrodos (ánodo y cátodo), matriz donde se almacena el electrolito de ácido fosfórico, separador con placa de enfriamiento y sistema de entrada múltiple (manifolds). Los electrodos contienen el catalizador apoyado en una mezcla de carbón negro y pegamento polimérico (usualmente PTFE) que en conjunto forma una estructura que da soporte al electrodo.

El electrolito se conforma de ácido fosfórico ya que tiene una alta solubilidad con el O_2 , buena conductividad iónica a alta temperatura, baja velocidad de corrosión y baja presión de vapor (Tulio, 2004). El ácido está contenido dentro de la matriz cuya función es retener el ácido fosfórico por medio de la elevada acción capilar del material de diseño de la matriz, generalmente se utiliza carburo de silicio (SiC) con una cantidad moderada de PTFE esparcida aleatoriamente, además la matriz debe evitar el cruce de gases a través de ella y mantener la estabilidad química a altas temperaturas.

Los separadores se encargan de evitar la mezcla del hidrógeno en altas concentraciones que se encuentra en el ánodo con el aire del cátodo de la celda más próxima, además tiene la doble función de conectar dos celdas eléctricamente permitiendo así una conexión en serie para suministrar un alto

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

voltaje. El requerimiento del material del separador es: impermeabilidad ante los gases, estabilidad química de frente a la naturaleza del ácido fosfórico, buena conductividad eléctrica y térmica, así como resistencia mecánica ya que el separador sirve como soporte mecánico del conjunto de celdas. Generalmente se construye de carbón vítreo o de algún polímero de carbón.

El desempeño de la celda está en función de la presión, temperatura, composición del gas reactante y utilización del combustible. La presión de la celda modifica el potencial eléctrico en función del gradiente de presiones como se muestra en la Ecuación 3.11 donde ΔV_p está en mV, esta ecuación es válida si la celda opera entre $1 \text{ atm} \leq P \leq 10 \text{ atm}$

$$\Delta V_p = 146 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (3.11)$$

En condiciones estándar (el producto es vapor de agua) el aumento de la temperatura tiene un efecto positivo en el desempeño de la batería ya que se reduce la polarización de activación, transferencia de masa por polarización y la disipación óhmica, la pérdida o ganancia de voltaje corresponde al aumento o disminución de la temperatura de funcionamiento de la celda (Ec. 3.12) donde la temperatura está en grados centígrados y en un rango de $180 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 250 \text{ }^\circ\text{C}$ donde el resultado de la ecuación está en mV.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

$$\Delta V_T = 1.15 (T_2 - T_1) \quad (3.11)$$

La cantidad y calidad de gas que llega al electrodo y la utilización del mismo tiene un efecto directo en el comportamiento de la celda, si la concentración del gas de entrada disminuye el desempeño pierde eficiencia ya que aumenta la concentración de polarización al mismo tiempo que las pérdidas de energía en la ecuación de Nernst son de un orden mayor. El análisis de concentración y presión parcial del gas reactante se realiza en el cátodo y ánodo independientemente. La Ecuación 3.12 corresponde al uso de aire como oxidante y la Ecuación 3.13 se utiliza cuando el agente oxidante es aire enriquecido con oxígeno, ambas en mV donde \bar{P}_{O_2} es la presión del oxígeno.

$$\Delta V_{cátodo} = 148 \log \frac{(\bar{P}_{O_2})_2}{(\bar{P}_{O_2})_1} \quad 0.04 < \frac{\bar{P}_{O_2}}{P_{Total}} < 0.20 \quad (3.12)$$

$$\Delta V_{cátodo} = 96 \log \frac{(\bar{P}_{O_2})_2}{(\bar{P}_{O_2})_1} \quad 0.20 < \frac{\bar{P}_{O_2}}{P_{Total}} < 1.00 \quad (3.13)$$

El combustible del ánodo puede provenir de gas natural, subproductos del petróleo, carbón o electrólisis que en cualquiera de los casos el desempeño de la celda lo describe la Ecuación 3.14 donde el cambio en la presión

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

parcial del hidrógeno (\bar{P}_{O_2}) se debe al cambio en la composición del combustible o al grado de utilización.

$$\Delta V_{ánodo} = 55 \log \frac{(\bar{P}_{O_2})_2}{(\bar{P}_{O_2})_1} \quad (3.14)$$

La concentración de monóxido de carbono en la celda afecta directamente la reacción de catálisis en el ánodo ya que aumenta el tiempo de reacción del Pt, de acuerdo con Benjamin, et al. La ecuación que describe el cambio de voltaje debida a presencia de CO en el combustible es la 3.15 donde $k(T)$ es función de la temperatura y su valor se encuentra en la Tabla 3.2, $[CO]_1$ y $[CO]_2$ la fracción molar de CO que contiene el combustible.

$$\Delta V_{CO} = k(T)([CO]_2 - [CO]_1) \quad (3.15)$$

Temperatura (°K)	Temperatura (°C)	K(T)
325	163	-11.1
351	177	-6.14
374	190	-3.54
399	204	-2.05
424	218	-1.30

El voltaje que Tabla 3.2 Coeficiente en función de la temperatura se obtiene de

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

una PAFC se reduce debido a las pérdidas óhmicas, pérdidas de activación y concentración que aumentan a la par de la densidad de corriente. La magnitud de la disipación de energía se obtiene con la siguiente tabla:

ΔV_j (mV)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Condición de funcionamiento
-0.53	100 - 200	8 atm, 210 °C
-0.39	200 - 650	8 atm, 210 °C
-0.74	50 - 120	Condiciones atmosféricas
-0.45	120 - 215	Condiciones atmosféricas

Tabla 3.2 Diferencial de voltaje por intensidad de corriente

Uno de los aspectos principales en la eficiencia de la celda de hidrógeno es aumentar la vida útil de la misma, el objetivo es mantener el desempeño de la celda durante el tiempo de uso (~40,000 horas) que en pruebas que se realizan en laboratorio se observa una disminución en el voltaje de la celda, el valor máximo de la reducción en el desempeño es de -2 mV/1,000 horas.

3.1.3. CELDA DE COMBUSTIBLE ALCALINA (AFC)

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

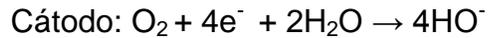
La celda de combustible alcalina (AFC) es una de las primeras en ser desarrollada en el mundo en el inicio de la década de 1960 para abastecer de energía al programa espacial Apollo donde se pudo corroborar su alto desempeño en comparación con otro tipo de celdas, sin embargo, el diseño de celda alcalina que opera en el espacio funciona con hidrógeno y oxígeno puro con una presión de funcionamiento entre 40 y 55 atm a temperaturas cercanas a los 200 °C. El mayor reto en el desarrollo de la celda alcalina es hacerla funcionar con alta eficiencia al alimentarla con aire terrestre a presión atmosférica, el mayor inconveniente con el uso de la AFC en la atmósfera terrestre es que el CO₂ del aire reacciona con el ión que transporta el electrolito, para contrarrestar este efecto se emplea un filtro de cal sodada en la entrada del gas en el cátodo para impedir el paso del dióxido de carbono.

Es en la industria automotriz donde la celda alcalina tiene un amplio potencial de aplicación con una vida útil de ~5,000 horas (cuando se utiliza un filtro de cal sodada) ya que la celda se encuentra prácticamente inactiva cuando se apaga el auto y el tiempo de vida útil considera únicamente las horas de operación verdadera.

La reacción química necesaria para producir potencial eléctrico con una celda de combustible alcalina en el ánodo y cátodo corresponden a las siguientes ecuaciones:



APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA



La concentración del electrolito de hidróxido de potasio (KOH) se encuentra entre un 35% y 50% en forma de electrolito líquido circulante que se encuentra disuelto en agua siendo este tipo de celda alcalina la que tiene aplicación terrestre, la celda alcalina de electrolito inmovilizado funciona únicamente en el espacio exterior o en ambientes cerrados debido a su alta sensibilidad al CO_2 además que su desarrollo se encuentra terminado y la información es de uso exclusivo del Space Shuttle Orbiter.

El desempeño de la celda alcalina se define a través de la presión y temperatura de funcionamiento de la celda, pureza del combustible, densidad de corriente y pérdidas óhmicas, de activación y disminución de concentración.

La variación de voltaje (mV) por cambio en la presión de funcionamiento está dada por la Ecuación 3.16 donde la temperatura (T) está en escala Kelvin.

$$\Delta V_p = 0.15T \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (3.16)$$

En la celda de combustible alcalina la eficiencia aumenta conforme lo hace la temperatura debido a que la carga de polarización por activación, polarización por transferencia de masa y las pérdidas óhmicas se ven

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

reducidas conforme la temperatura de operación aumenta. Los trabajos realizados por McBreen muestran que el coeficiente de temperatura es mucho menor cuando la temperatura supera los 63 °C lo que lleva a McBreen a proponer dos ecuaciones para estimar la diferencia de potencial por cambio de temperatura cuando esta se encuentra por debajo de los 63 °C y cuando se encuentra por encima de ese valor cuando la densidad de corriente es 100 mA/cm².

$$\Delta V_1 = 4.0(T_2 - T_1) \quad \text{para } T < 63^\circ\text{C} \quad (3.17)$$

$$\Delta V_1 = 0.7(T_2 - T_1) \quad \text{para } T > 63^\circ\text{C} \quad (3.18)$$

Las pérdidas por densidad de corriente incluyen la disipación de energía debida a la resistencia óhmica, activación y pérdidas de concentración de combustible. Todos estos factores dependen de la concentración del electrolito, temperatura y composición del gas en el cátodo (O₂ o aire).

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

ΔV_J (mV)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Condición de funcionamiento
-0.18	40 - 100	9N KOH, 60 °C, suministrando O ₂
-0.31	40 - 100	9N KOH, 60 °C, suministrando aire
-0.74	50 - 200	12N KOH, 65 °C, suministrando O ₂
-0.45	50 - 200	12N KOH, 65 °C, suministrando aire

Tabla 3.3 Diferencial de voltaje por intensidad de corriente

Las celdas alcalinas diseñadas por UTC Fuel Cell muestran una degradación de ~25 mV/1,000 horas además de probar un funcionamiento estable de por lo menos 5,000 horas con una degradación de potencial de 20 mV/1,000 horas o menor. Aunque actualmente se alcanza un periodo de vida útil >8,000 horas el verdadero reto se encuentra en producir una celda con vida útil de 40,000 horas.

3.2. SISTEMA INTEGRAL DE ENERGÍA DE OLEAJE

La elección del tipo de celda involucra aspectos de capacidad de producción del sistema, eficiencia y costo de almacenamiento. De acuerdo a la electricidad producida y al tiempo relativamente corto de almacén es

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

conveniente utilizar sistemas que trabajan con hidrógeno y la cuestión es: ¿se debe generar hidrógeno con el total de energía producida o únicamente cuando se rebase la potencia mínima garantizada. En la Figura 3.3 se muestra el sistema integral de energía de oleaje mediante el almacenamiento de toda la energía mediante obtención de hidrógeno por electrólisis (Currie, 2002).

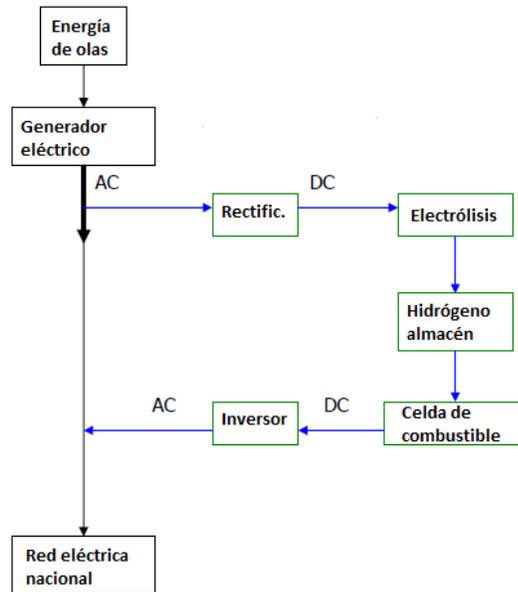


Figura 3.3 sistema integral de energía de oleaje con interconexión a la red (Currie, 2002)

4. ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

La Columna Oscilante de Agua fue el primer sistema a nivel mundial en ser utilizado para generar energía eléctrica a partir del oleaje de manera comercial con la planta Islay LIMPET que genera 250kW y se encuentra en Rhinns of Islay en la costa de Escocia en el Reino Unido, su desarrollo estuvo bajo la supervisión de la empresa Wavegen y la Queen's University Belfast. El presente capítulo se basa en la propuesta técnica de Islay LIMPET. La geometría de la columna se basa en el diseño realizado por Wavegen ya que optimiza el aprovechamiento del oleaje y permite que el sistema trabaje de manera estable durante todas las épocas del año. Un diagrama de una Columna Oscilante de Agua se muestra en la Figura 4.3 (Cunha, 2012)

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

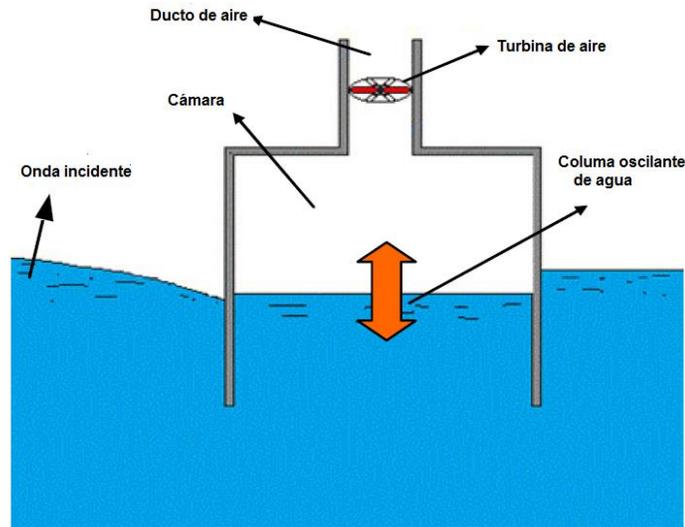


Figura 4.3 Esquema de la Columna Oscilante de Agua

4.1.1. TEORÍA DE LA COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

La teoría que se aplica en el diseño y análisis del funcionamiento del sistema se basa en los parámetros físicos del oleaje (H y T) así como de la morfología de la zona donde se va a instalar la planta. Con la altura significativa del oleaje se obtiene el nivel de agua en la cámara de aire. La Columna funciona mediante un gasto de aire promedio que se calcula con la Ecuación 4.1 donde V_c y V_v con el volumen en la cresta y en el valle del oleaje, T_p es el periodo pico del oleaje (Cunha, 2012).

$$Q_i = \frac{V_{vi} - V_{ci}}{T_{pi}} \quad (4.1)$$

Las características físicas de la turbina Wells incluye una solidez del 0.67, velocidad de giro de 450rpm, cinco aspas, longitud de aspa de 0.4m con

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

perfil tipo NACA0021 (Cunha, 2012), cuerda de 0.17m, el radio de la turbina (R_t) es de 1m y el radio del buje (r_h) de 0.6m.

La conversión de energía undimotriz en energía neumática se rige por la presión del aire en el dispositivo la cual varía de acuerdo a la Ecuación 4.2 donde ρ es la densidad del aire, W es la velocidad relativa del aire respecto a la turbina, Z es el número de aspas de la turbina, b es la longitud del álabe, c es la longitud de la cuerda, V_a es la velocidad del aire al pasar por la turbina, C_A es el coeficiente de fuerza axial para el perfil del álabe empleado en la turbina tipo Wells y Q es el caudal de aire (Cunha, 2012).

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho W^2 Z b c V_A \frac{C_A}{Q} \quad (4.2)$$

La velocidad relativa del aire respecto del álabe se calcula mediante el análisis vectorial de la velocidad de rotación y la velocidad del aire (Carija, 2012) como se presenta en la Figura 4.4.

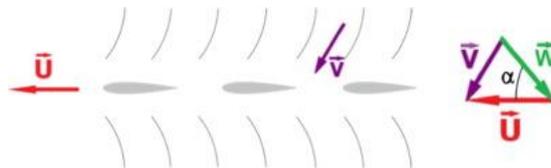


Figura 4.4 Representación de la velocidad de giro (U), velocidad del aire (V), velocidad relativa (W) y el ángulo α respecto a la horizontal.

El torque en la turbina se define en la Ecuación 4.3 donde R_t es el radio de la turbina, C_A es el coeficiente de arrastre y C_T es el coeficiente de fuerza axial,

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

C_A (Ecuación 4.4) y C_T (Ecuación 4.5) están en función de la velocidad relativa y del ángulo α respecto a la horizontal (Ying, 2016)

$$T = (1/2)\rho W^2 ZbcR_t C_T \quad (4.3)$$

$$C_A = \Delta p \pi R_t^2 / [(1/2)\rho(V_A^2 + U_t^2)zbc] \quad (4.4)$$

$$C_T = F_T / [(1/2)\rho(V_A^2 + U_t^2)zbc] \quad (4.5)$$

Se puede demostrar que los coeficientes de arrastre y de torque se encuentran en función de la geometría del álabe de la turbina (Cunha, 2012) y para el perfil utilizado en este trabajo $C_L=0.169$ y $C_D=0.007$ que corresponde al perfil NACA002, los coeficientes dependen de la respuesta del álabe al paso del aire (Figura 4.5). El coeficiente de arrastre C_A y coeficiente de torque C_T están en función del coeficiente C_L y C_D y del ángulo de ataqué del aire (α) como se muestra en las Ecuación 4.6 y 4.7 (Cunha, 2012).

$$C_A = C_L \cos(\alpha) + C_D \text{sen}(\alpha) \quad (4.6)$$

$$C_T = C_L \cos(\alpha) - C_D \text{sen}(\alpha) \quad (4.7)$$

$$\Phi = \tan(\alpha) = \frac{V_A}{U_R} \quad (4.8)$$

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

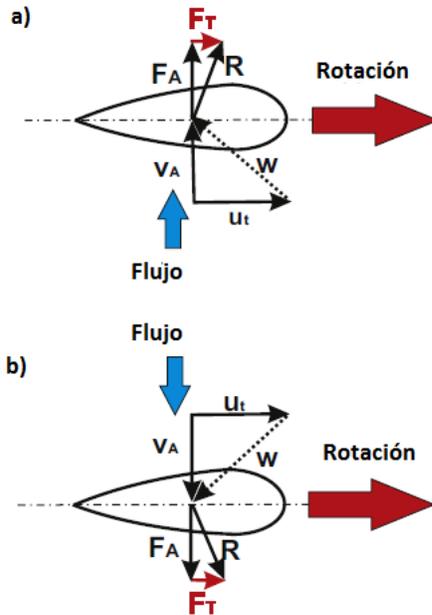


Figura 4.5 Sentido de flujo y rotación del perfil empleado en la turbina de aire

La potencia ideal que entrega la turbina (Ecuación 4.9) depende de la densidad del aire (ρ), área de barrido de la turbina (A) y velocidad del aire al pasar por la turbina (V_a) sin embargo esta formulación no incluye las pérdidas de energía durante el proceso. La eficiencia de la turbina (Ecuación 4.10) es la relación entre la potencia generada por el rotor y la energía de la cámara de aire (Cunha, 2012), dicha eficiencia al ser multiplicada por la potencia ideal da como resultado la potencia real estimada para el sistema.

$$P = (1/2)\rho A(V_A)^3 \quad (4.9)$$

$$\eta_T = \frac{\sum_i T_i \omega_i}{\sum_i \Delta p_i Q_i} \quad (4.10)$$

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

4.2. DESCRIPCIÓN DE LA COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

El sistema de captura de oleaje se instala en un acantilado que cuente con las características de intensidad de oleaje suficiente para producir energía el máximo de horas al año, la Figura 4.6 contiene la forma que debe tener el acantilado en su estado natural y el proceso constructivo general que se debe seguir durante la instalación del dispositivo (Wavegen, 2002).

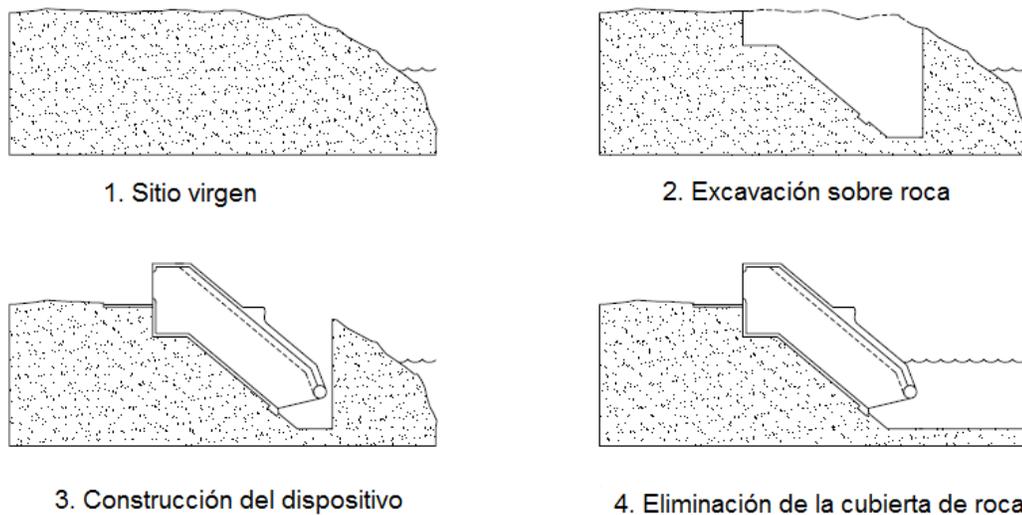


Figura 4.6 Proceso de colocación del sistema de captura de oleaje (Wavegen, 2002)

El colector consta de una estructura de concreto reforzado (Figura 4.7). Para la mayor parte de la longitud el muro frontal y posterior son paralelos y

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

forman un ángulo de 40° con la horizontal. En la cercanía del borde de entrada en la cara externa, se forma un ángulo de 60° que reduce el área de entrada del agua y atenúa las variaciones en la potencia del oleaje. El equipo de la QUB ha establecido que la geometría del borde en la entrada del agua limita el flujo de agua hacia el exterior del colector, sin embargo, la restricción a la entrada es mínima. La restricción a la salida del agua es importante debido a que cuando el colector se vacía de agua entonces se produce un conducto de aire de la atmósfera y en ese momento la turbina no podrá generar un potencial aprovechable, no obstante, este efecto se ve sumamente mitigado con la geometría del borde de entrada (Wavegen, 2002).

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

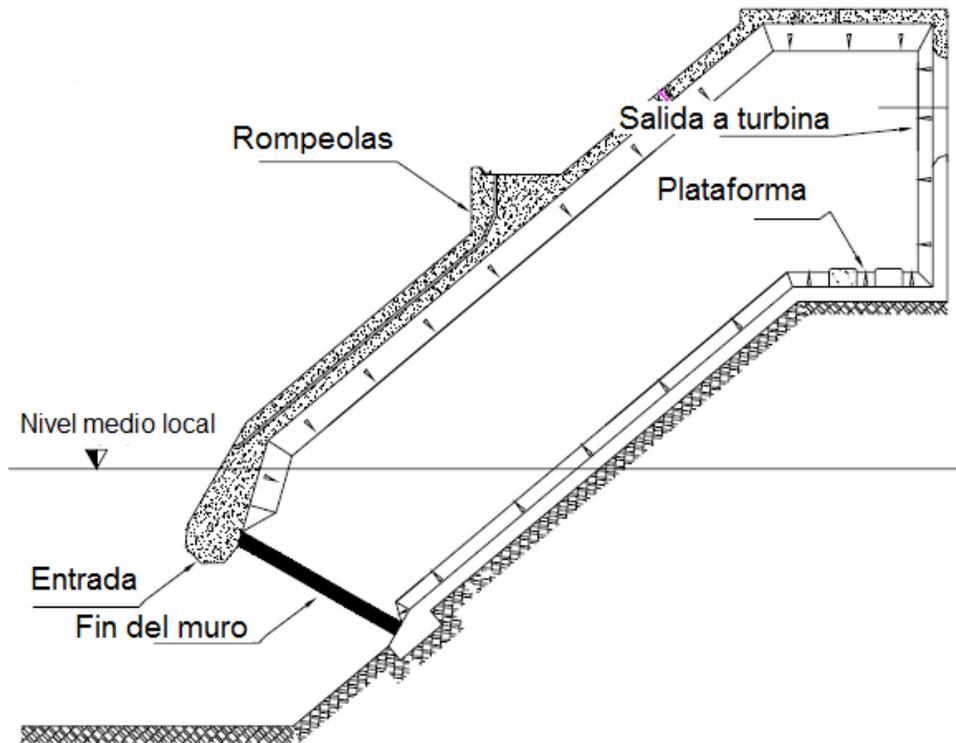


Figura 4.7 Elevación lateral de la sección del colector

La sección axial del colector (Figura 4.8) consta de 21 metros de longitud dividida en tres partes, esta división es necesario para que no exista propagación transversal del oleaje lo que reduce la eficiencia en la captura de la energía del oleaje, aunque se sabe que el ancho del dispositivo prototipo es de 6 metros y funciona satisfactoriamente, se cree que un aumento significativo por encima de este valor podría cruzar el límite de aceptabilidad en el desempeño y estabilidad estructural del sistema (Wavegen, 2002). Una vez establecida la sección transversal de la cámara de aire, se decidió qué método debía adoptarse para sujetar las cuatro

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

paredes a la roca base. Había dos opciones claras; ya sea las paredes se podrían fijar directamente a la pendiente excavada con anclas de roca o una pared trasera podría ser colocada en la pendiente excavada de modo que la estructura monolítica formase un circuito cerrado en términos de contención de la carga. En la construcción de la planta Islay LIMPET se eligió colocar una sección monolítica (Wavegen, 2002). La estructura se encuentra sujeta a cargas en sentido descendente debido a la acción del oleaje externo y a fuerzas con sentido ascendente que se generan por la presión de la Columna Oscilante. Las pruebas que realizó la QUB indican que estas presiones oscilan alrededor de 1bar lo que se traduce en una carga lineal de 450kN/m sin considerar el peso de la propia estructura. Esto unido al hecho de que la calidad de la superficie de roca a la cual las paredes estarían ancladas no se conoce hasta después de que la excavación se completa y que una superficie rugosa en la columna de agua posterior disminuiría el rendimiento de la columna reduciendo la capacidad de anclaje. A pesar de las condiciones físicas del sitio, la mejor opción es colocar un muro posterior que sirve de anclaje para la estructura (Wavegen, 2002).

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

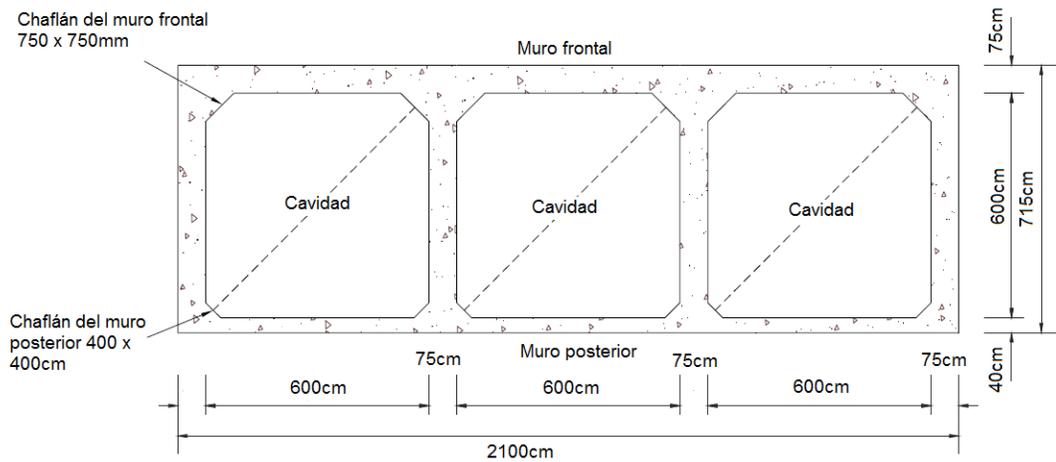


Figura 4.8 Sección axial del colector de olas (área efectiva de aprovechamiento del oleaje)

Para medir el desempeño del colector de energía undimotriz es necesario instalar una serie de dispositivos que ayudan a conocer las condiciones físicas fuera y dentro de la estructura (Wavegen 2002) que dan a conocer el estado de mar, carga sobre los muros, nivel del agua dentro del colector, presión del aire antes y después de la turbina, temperatura del sistema, video de vigilancia interna del colector, presión atmosférica y la interface de control del sistema (Figura 4.9).

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

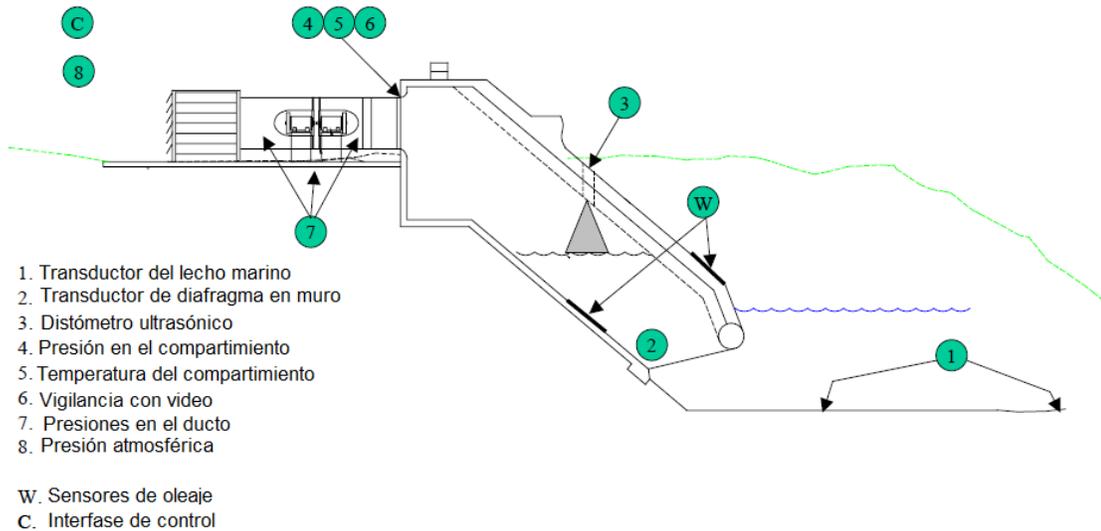


Figura 4.9 Dispositivos de lectura en el colector y sus alrededores

4.3. CASO DE ESTUDIO: MANZANILLO COLIMA

La zona de estudio se centra en la costa sur del puerto de Manzanillo en el estado de Colima que está bajo la influencia de la Corriente Ecuatorial del Norte. La región de estudio se muestra en la Figura 4.10 y abarca una zona de entre 3km y 5km siendo el lugar más propicio para este caso la isla que se ubica a 500m de la costa sur de Manzanillo.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA



Figura 4.10 Zona de estudio perteneciente a Manzanillo, Colima

El registro del estado de mar de Manzanillo se obtiene del Atlas de Oleaje de la República Mexicana (Silva, 2007) el cual consta de datos horarios de altura de oleaje, periodo y dirección de un periodo de sesenta años (de 1948 a 2007) dando como resultado un total de 525,600 datos de oleaje. La Figura 4.11 muestra el hidrograma para aguas profundas en Manzanillo, el estado de mar con mayor ocurrencia es con altura de oleaje de 0.4-0.8m y periodo de 4.9-6.0s.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

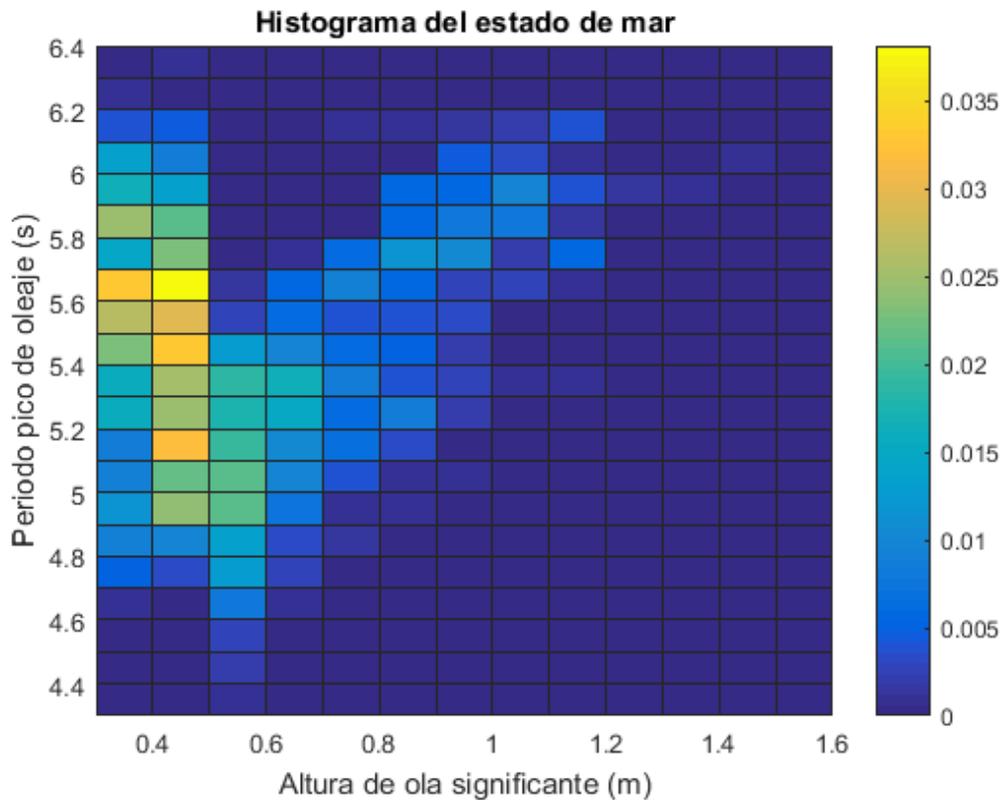


Figura 4.11 Probabilidad de ocurrencia del estado de mar en Manzanillo

Para simular el funcionamiento del sistema de captura y aprovechamiento del oleaje se crea una rutina en MATLAB 2016 que realiza los cálculos de la teoría de la Columna Oscilante para cada estado de mar que se presenta en la zona de estudio, la muestra de datos de oleaje es una distribución bivariada y se realiza el procedimiento de cálculo dato por dato dando como resultado un total de 525,600 respuestas del sistema ante los distintos estados de mar. Este resultado de la potencia generada incluye las pérdidas

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

debidas a la conversión de energía hidrodinámica en neumática, y de energía neumática en mecánica sobre la turbina, así mismo las pérdidas del generador de inducción, en la Tabla 4.1 contiene las medidas representativas de la muestra de datos de producción eléctrica del sistema.

Media(kW)	Moda(kW)	Máximo(kW)	Mínimo(kW)	Desv. Est.(kW)
5.96	4.39	21.72	2.13	3.52

Tabla 4.1 Datos estadísticos de la simulación del funcionamiento de la COA

Para conocer la capacidad de suministro de energía que puede realizar el sistema es necesario contemplar las variaciones de energía a lo largo de la vida útil del proyecto, como el oleaje se presenta de manera ininterrumpida durante todas las épocas del año, es necesario atenuar las variaciones en el potencial generado mediante el almacenamiento de energía en épocas de excedencia para posteriormente utilizarla cuando el sistema no sea capaz de abastecer el suministro base. Para realizar esta labor primero es necesario fijar un suministro base, a partir de este dato se almacena la energía excedente con sus respectivas pérdidas debido al proceso de electrólisis y al uso de la celda de combustible, mediante un proceso iterativo de una rutina de MATLAB se conoce el suministro base efectivo y el funcionamiento del sistema en las distintas épocas del año. El análisis del funcionamiento de la COA da como resultado que el sistema abastece una carga base de 5kW de manera constante.

CONCLUSIONES

La potencia que garantiza el sistema de captura de oleaje con la Columna Oscilante de Agua es de 5kW, esta energía se produce en un área horizontal sobre el mar de 126m², con estas cifras se estima que el sistema tiene un rendimiento de 39.7 W/m².

La producción que se realiza en manzanillo tiene la posibilidad de ser utilizada en sitios cuya demanda energética sea más intensa por la noche, tal como alumbrado público, edificios residenciales, así mismo existe una demanda considerable de energía por parte del Centro Ecoturístico Aquarium el cual se encuentra a escasos 1000 metros de la zona más viable para instalar el dispositivo. La electricidad que suministra el sistema undimotriz permitiría abastecer el Centro de Estudios Tecnológicos del Mar 12 o la colonia Campos, la primaria Susana Ortiz Silva, Secundaria Ricardo Flores Magón o incluso la Subgerencia Regional de Generación Termoeléctrica Occidente (SRGTO). Existen colonias aledañas susceptibles de ser abastecidas con el sistema, por mencionar algunas se encuentra La Pedregoza, El Chamizal, PAFre Hidalgo y El Tamarindo entre otras, sin embargo, se requiere un sistema de transporte de alrededor de 5km.

Con la potencia que generaría el sistema es posible hacer funcionar de manera continua 36 computadoras de escritorio en estado activo, sin

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

embargo por lo general las PC's se encuentran activas unas cuantas horas al día pero este dato de horas activas es variable. Otra opción para el uso de la energía generada en Manzanillo es mantener encendidas 375 luminarias de 40W durante ocho horas al día. La energía que se produce con la Columna Oscilante es suficiente para abastecer cinco casas residenciales con refrigerador, microondas, TV, licuadora, Laptop, plancha y diez lámparas ahorradoras.

Si bien es cierto que la energía se produce con el estado actual de funcionamiento del sistema es considerable y de gran ayuda para alcanzar las metas nacionales en materia energética, también es necesario realizar medidas de optimización al sistema de oleaje para maximizar su desempeño y poder garantizar un mayor suministro de energía ya que con el sistema tal y como se propone se necesita de una granja de 100 dispositivos de Columna Oscilante de Agua para abastecer 500 hogares.

Para la investigación futura se proponen las siguientes actividades para el sistema de energía de captura de energía undimotriz mediante Columna Oscilante de Agua:

- Estudiar el impacto que tiene la instalación del distribuidor de aire en la turbina ya que con el distribuidor cambia la dirección del aire y la velocidad se ve aumentada de dos a cuatro veces modificando el diagrama de velocidad relativa del aire.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

- Obtener el número de aspas óptimo que brinda a la turbina una mayor eficiencia y desempeño.
- Aplicar el sistema de ángulo de auto ajuste de álabe (*self blade pitch angle*) para aumentar el desempeño del sistema.
- Optimizar la geometría de la cámara de aire para que el volumen de aire desplazado sea el máximo con una estructura de cono invertido.
- Incluir el efecto de los términos de segundo grado que influyen de manera significativa en el desempeño del sistema, estos parámetros incluyen la pérdida de energía debido a que se turbinan solo una fracción del volumen de aire del que se considera en la teoría lineal y disipación de energía debido a la interacción de la interface agua-aire en la cámara de gases del colector.

BIBLIOGRAFÍA

1. Guedes C. (2013). *Evaluation of Various Technologies for Wave Energy Conversion in the Portuguese Nearshore* de energies Sitio web: <http://www.mdpi.com/journal/energies>
2. Lewis, T. (2014). *A Remotely Operated, Autonomous Wave Energy Converter System*. Doctor of Philosophy. Oregon State University.
3. Bevilacqua G. & Zanuttigh B. (2012). Overtopping Wave Energy Converters: general aspects and stage of development. 2015, de Università di Bologna Sitio web: http://amsacta.unibo.it/3062/1/overtopping_devicex.pdf
4. Drew B., Plummer A. & Sahinkaya M. (2009). A review of wave energy converter technology. 2015, de University of Bath Sitio web: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/2/23/Drew,_B.,_Plummer,_A.R.,_Sahinkaya,_M.N._A_review_of_wave_energy_converter_technology._2009.pdf
5. Tedd J. (2007). Testing, Analysis and Control of Wave Dragon, Wave Energy Converter. 2016, de Aalborg University Sitio web: http://vbn.aau.dk/files/12994787/Wave_Energy_Converter
6. Pérez A. (2013). ESTIMACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO Y LA ENERGÍA DE OLEAJE DISPONIBLE EN LAS COSTAS MEXICANAS. Agosto 2015, de Universidad Nacional Autónoma de México
7. Cunha G., Santos S., Santos E., Rocha L. & Olinto C.. (2012). Análise teórica da influência de perfis sobre a potência de uma turbina wells empregada em dispositivos de conversão de energia das ondas GIA DAS ONDAS. 2015, de Seminário e workshop em engenharia oceânica Sitio web: <http://www.seer.furg.br/vetor/article/view/3690/2185>
8. Falnes J. & Kurniawan A. (2015). Fundamental formulae for wave-energy conversion. 2016, de Royal Society Sitio web: <http://rsos.royalsocietypublishing.org/content/2/3/140305#disp-formula-32>
9. Newman JN. 1976 The interaction of stationary vessels with regular waves. In Proc. 11th Symp. On Naval Hydrodynamics, pp. 491–501. London, UK: Mechanical Engineering Publications.
10. Budal K, Falnes J. 1975 Power generation from ocean waves using a resonant oscillating system. Mar. Sci. Commun. 1, 269–288.
11. Evans DV. 1980 Some analytic results for two- and three-dimensional wave-energy absorbers. In Power from sea waves (ed. Count BM), pp. 213–249. New York, NY: Academic Press.
12. Fernandes AC. 1985 Reciprocity relations for the analysis of floating pneumatic bodies with application to wave power absorption. In Proc.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

- 4th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symp., Dallas, TX, 17–21 February 1985, pp. 725–730. New York, NY: American Society of Mechanical Engineers.
13. Falcão AFdO, AJ NA Sarmiento. 1980 Wave generation by a periodic surface pressure and its application in wave-energy extraction. In 15th Int. Cong. on Theoretical and Applied Mechanics, Toronto, Canada, 17–23 August 1980. Amsterdam, the Netherlands: North-Holland.
 14. Bustos E. (2010). Análisis de sensibilidad. Febrero del 2016, de Universidad de Chile Sitio web: http://users.dcc.uchile.cl/~nbaloian/DSS-DCC/Esp/3_5.pdf
 15. Sorensen H. & Friis E. (2010). Wave Dragon from Demonstration to Market. Wave Dragon from Demonstration to Market, de International Conference on Ocean Energy, la información se encuentra en el sitio web: https://www.icoe-conference.com/publication/wave_dragon_from_demonstration_to_market
 16. Alzamora E. (2012). Evaluación Técnica y Financiera de Alternativas Energéticas Renovables no Convencionales para incorporar a la Gestión Energética del Casino de Suboficiales Badilla, III Brigada de la Fuerza Aérea de Chile, Puerto Montt. Puerto Montt, Chile: Austral de Chile.
 17. Jackson G. & Boxx R. (2012). Persistence and Survival in Entrepreneurship: The Case of the Wave Energy Conversion Corporation of America. 2016, de Sacred Heart University que cuenta con un portal en internet, Sitio web: <http://digitalcommons.sacredheart.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=neje>
 18. Falcao AF de O. Wave energy utilization: a review of technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009; 14(3):899e918.
 19. Previsic M, Bedard R, Hagerman G. E2I EPRI assessment, offshore wave energy conversion devices. Electricity Innovation Institute; 2004. Technical report E2I EPRI WP - 004 - US - Rev 1.
 20. Evans DV. Hydrodynamics of ocean wave-energy utilization Iutam Symposium Lisbon/Portugal; 1985.
 21. Kerbiriou M, Prevosto M, Maisondieu C, Babarit A, Clément AH. Influence of an improved sea-state description on a wave energy converter production. In: Proc. of the 26th international conference on offshore mechanics and arctic engineering; 2007. San Diego, California.
 22. Henderson R. Design, simulation and testing of a novel hydraulic power takeoff system for the Pelamis wave energy converter. Renewable Energy 2006; 31(2): 271-83.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

23. Eriksson M. Modeling and experimental verification of direct drive wave energy conversion - Buoy - generator dynamics, PhD thesis, Uppsala Universitet; 2007.
24. Suzuki M. Design method of guide vane for wells turbine. *Journal of Thermal Science* 2006; 15: 126-31.
25. Budal K, Falnes J, Hals T, Iversen LC, Onshus T. Model experiment with a phase controlled point absorber. In: Stephens HS, Stapleton CA, editors. *Proceedings of second international symposium on wave and tidal energy*. Cambridge, UK: ISBN 0-906085-43-9, pages 191e206; September 1981. p. 23e5. BHRA Fluid Engineering (Cranford, Bedford).
26. Betancourt, B. (2012). Determinación de clima marítimo en zonas costeras. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de México.
27. Bonet, R. (1999). Condición absorbente discreta no-local (DNL) en elementos finitos para modelos de propagación de ondas en el mar. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol 15 , 5-20.
28. EREC. (2010). *Renewable Energy in Europe, Markets, Trends and technologies*. European Renewable Energy Council.
29. Fernandez, J. (2008). Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad. Informe fin de carrera de la Universidad Politécnica de Madrid.
30. Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. USA: Cambridge University Press.
31. Lancin, M. (1976). Estudio geomorfológico de la bahía y de la playa de Santiago en Manzanillo, Colima. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 43-66.
32. Silva, R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. México DF: Serie Docencia 49., Instituto de Ingeniería de la UNAM.
33. Babarit A., Hals J., Muliawan M.J., Kurniawan A., Moan T. & Krokstad J. (2012). Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. 2016, de ELSEVIER Sitio web: www.elsevier.com/locate/renene.
34. Queen's University of Belfast, ISLAY LIMPET WAVE POWER PLANT (2002)
35. Vicinanza D., Margheritini L., Kofoed J. & Buccino M.. (2012). The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments. Marzo del 2016, de energies Sitio web: www.mdpi.com/journal/energies
36. Comisión Federal de Electricidad. (2012). TARIFAS ELÉCTRICAS EN MÉXICO. 2016, de Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

- Sitio web: www3.diputados.gob.mx/camara/.../Contexto-No.31-tarifas_electricas.pdf
37. Silva C., Modelos de oleaje, Apuntes y presentación de aula para la Universidad Nacional Autónoma de México.
 38. Fernandez D. (2010). Energía de las olas. Agosto 2015, de Universidad de Cantabria Sitio web: http://www.ecodesarrollo.cl/descargas/Energia_olas.pdf
 39. Ruiz G., Mendoza E. & Silva R. (2009). CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN DE OLEAJE Y VIENTO DE 1948-2007 EN EL LITORAL MEXICANO. Agosto 2015, de Fundación para el fomento de la ingeniería del agua
 40. Brooke J... (2005). WAVE ENERGY CONVERSION. Amsterdam - Boston - Heidelberg - London - New York- Oxford Paris - San Diego - San Francisco - Singapore - Sydney- Tokyo: McCormick.
 41. Currie R. (2002). Hydrogen, Fuel Cells and the Optimization of the LIMPET 500 on Islay. Glasgow, Scotland: University of Strathclyde Glasgow.
 42. Zhou D., Eden j... (2015). Optimal Design of a Multibody Self-Referencing Attenuator. Agosto del 2016, de Scientific Research Publishing Sitio web: <http://www.scirp.org/journal/jpee> <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2015.39005>
 43. De Backer G... (2009). Hydrodynamic Design Optimization of Wave Energy Converters Consisting of Heaving Point Absorbers. Ghent University: <http://www.maritiem.ugent.be>.
 44. Lehmann M., Elandt R., Shakeri M. & Alam R. (2014). The Wave Carpet: Development of a submerged pressure differential wave energy converter. 2016, de Hobart, Australia Sitio web: Beckerly
 45. Yu Y., Li Y., Hallet K. & Hotimsky C. (2014). Design and analysis for a floating oscillating surge wave energy coverter. 2016, de Ocean, offshore and Arctir Engineering Sitio web: www.nrel.gov/publications
 46. Folley M., Whittaker T. & Osterried M. (2004). The Oscillating Wave Surge Converter. 2016, de School of Civil Engineering, Queen's University Belfast Belfast, UK Sitio web: Internet
 47. Sarkar D. & Dias F. (2016). Performance Enhancement of the Oscillating Wave Surge Converter by a Breakwater. 2016, de School of Mathematical Sciences, University College Dublin Sitio web: <http://www.isope.org/publications/publications.htm>
 48. Mendoza B. Edgar. Obras marítimas. Uiversidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería. 2015.
 49. Nexans Deutschland Industries. (2003). Submarine Power Cables. 2016, de NEXANS Sitio web: http://www.nexans.com/Germany/group/doc/en/NEX_Submarine_neu.pdf

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

50. Irshad M., Siraj K., Raza R., Ali A., Tiwari P., Zhu B., Rafique A., Ali A., Ullah M. & Usman A. (2016). A Brief Description of High Temperature Solid Oxide Fuel Cell's Operation, Materials, Design, Fabrication Technologies and Performance. 2016, de MDPI Sitio web: www.mdpi.com/2076-3417/6/3/75/pdf
51. Almarza J. (2010). Celdas de combustible. En Diseño y Fabricación de una Pila de Combustible de Hidrógeno de Baja Potencia (169). Catalunya, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
52. Tanni M., Arifujjaman M., Iqbal M. (2013). Dynamic Modeling a of Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) and Its Power Conditioning System. 2016, de Journal of Clean Energy Technologies Sitio web: www.jocet.org/papers/041-110002.pdf
53. EG&G Technical Services, Inc. (2004). All book. En Fuel Cell Handbook (1-427). U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory P.O. Box 880 Morgantown, West Virginia: Under Contract No. DE-AM26-99FT40575.
54. Tulio M. & Mesa L. (2004). PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE DE ÀCIDO FOSFÒRICO. 2016, de Universidad Tecnológica de Pereira Sitio web: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/174/PRINCIPIOS%20DE%20FUNCIONAMIENTO%20Y%20CONSTRUCCION.pdf;jsessionid=2F7E0B207B98BD46A3251A8467B54C90?sequence=1>
55. Gustavo da Cunha Dias, Sonia Magalhães dos Santos, Elizaldo Domingues dos Santos, Lui Alberto Oliveira Rocha, Cláudio Rodrigues Olinto. (09 de Novembro de 2012). ANÁLISE TEÓRICA DA INFLUÊNCIA DE PERFIS SOBRE A POTÊNCIA DE UMA TURBINA WELLS EMPREGADA EM DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS. En VSEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA(N/A). Rio Grande: Eng. Oceânica.

PÁGINAS ELECTRÓNICAS DE REFERENCIA

1. <http://www.scottishenergynews.com/wave-power-pioneer-pelamis-sinks-into-administration/>
2. www.oceanpowertechnologies.com/powerbuoy/
3. <http://awsocan.com/>
4. <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>
5. http://hydropower.inl.gov/hydrokinetic_wave/pdfs/day1/09_heavesurge_wave_devices.pdf

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

6. Beirão, P. (2007). Linear model identification of the Archimedes Wave Swing, de Universidad Técnica de Lisboa Sitio web: <http://web.ist.utl.pt/duarte.valerio/POWER2007.pdf>
7. <http://www.greenpatentblog.com/2012/02/08/making-waves-in-renewable-energy-the-aws-wave-swing-iii/>
8. <http://www.aquamarinepower.com/technology/how-oyster-wave-power-works.aspx>
9. <http://owcwaveenergy.weebly.com/index.html>
10. <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/>
11. <http://www.energiaadebate.com/Articulos/Enero2010/MulasdelPozo.htm>
12. <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.LOSS.ZS>
13. <http://www.unesa.net/unesa/html/sabereinvestigar/largoviaje/transportealmacenar.htm>
14. https://www.teslamotors.com/es_MX/powerwall
15. <http://www.schatzlab.org/spanish/fuelcell.html>
16. http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/pilas_1/pilas_1.html
17. <http://www.hidroproyectos.com/n?n=CENTRALES-HIDROELECTRICAS-DE-BOMBEO>
18. <http://www.fenercom.com/pages/pdf/formacion/09-10-2013-Almacenamiento%20de%20Energia%20IV/01-Almacenamiento-de-Energia-mediante-bombeo-Iberdrola>
19. http://www.diam.unige.it/~irro/richiama4_e.html
20. http://www.fp7-marinet.eu/public/img/SEAI_OEDU4.jpg
21. http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=HMF&Anio=2016
22. Álvarez F., López P. & Venegas F. (2011). Valuación económica de proyectos energéticos mediante opciones reales: el caso de energía nuclear en México. 2016, de Universidad Autónoma de Nuevo León Sitio web: www.economia.uanl.mx/.../Valuacion-economica-de-proyectos-energeticos
23. <http://www.lapuntavillas.com/>
24. <http://colimanoticias.com/termoelectrica-de-manzanillo-segundo-lugar-en-el-pais-para-generacion-de-energia-electrica/>