

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**



Evaluación del potencial energético del oleaje y su posible
conversión en energía eléctrica utilizando dispositivos comerciales
existentes en Playas de Rosarito, Baja California.

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

OCEANÓLOGO

PRESENTA

MARÍA ESTHER LEYVA OLLIVIER

Ensenada, Baja California Mayo de 2016

Evaluación del potencial energético del oleaje y su posible conversión en energía eléctrica utilizando dispositivos comerciales existentes en Playas de Rosarito, Baja California.

RESUMEN

El oleaje puede considerarse como una forma concentrada de la energía solar, se ha demostrado que la densidad de potencia de un oleaje moderado a alto es suficiente como para ser aprovechada como energía renovable. El litoral mexicano cuenta con 11,000 km de costa con un potencial energético estimado entre 5 y 25 kW, que podría ser explotable dependiendo de las características del dispositivo extractor de energía del oleaje que se utilice.

En este trabajo se evalúa la energía del oleaje en la zona frente a las instalaciones marítimas de la CFE, ubicadas en el municipio de Rosarito, B.C., y se analiza el desempeño de 5 convertidores de la energía del oleaje en energía eléctrica: Aqua BuOY, Pelamis, Wave dragon, Oyster y el Seawave Slot-cone Generator, para determinar el dispositivo comercial existente más eficiente para extraer la energía del oleaje.

Las características del oleaje en el área de estudio se determinaron a través de una simulación numérica de los años 1968 a 2014. Con los datos simulados se crearon matrices de distribución conjunta de altura significativa y periodo, mismas que se combinaron con las matrices de eficiencia de los dispositivos extractores de energía para calcular el potencial energético obtenible con cada convertidor.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes: La altura significativa más frecuente es de alrededor de 1 m y se encuentra asociada a periodos promedio de 6 y periodo asociados al pico espectral de 13 s. La producción de energía del Seawave Slot-cone Generator tiene un valor promedio de 70 kW y variaciones de 20 kW, el Wave dragon tiene un valor de 40 kW y variaciones de 10 kW; Los dispositivos Oyster, Pelamis y Aqua buOY tienen valores aproximadamente de 7, 5 y 1 kW, con pequeñas variaciones. Los dispositivos con mayores valores en extracción de energía por oleaje frente a las instalaciones marítimas de la CFE de Playas de Rosarito son SSG y Wave dragon. En conclusión es necesario evaluar más dispositivos con diseños más apropiados para las características del oleaje y del ambiente en la zona de estudio.

Palabras claves: Potencial energético, Oleaje, Energía eléctrica, dispositivos convertidores

Evaluación del potencial energético y su posible conversión
en energía eléctrica utilizando dispositivos comerciales
existentes en Playas de Rosarito, Baja California.

TESIS

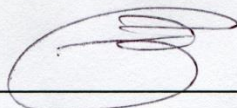
Que presenta:

María Esther Leyva Ollivier

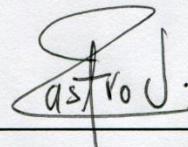
Aprobado por:



Dr. Héctor García Nava



Dr. Rafael Hernández Walls



Dr. Rubén Castro Valdez

Dedicatoria

A mi mamá, abuela y hermana, que me apoyaron durante esta etapa de mi vida y nunca me dejaron sola.

Agradecimientos

Mi director de tesis Dr. Héctor García Nava por darme un gran tema para trabajar, además de su paciencia, apoyo y enseñanzas durante todo este estresante proceso.

Al Laboratorio de Oleaje del CICESE por darme los datos de las simulaciones numéricas del oleaje en Rosarito, los cuales se obtuvieron en el marco del proyecto *pe-oleajePBC* (CONACYT-SENER 119798)

A mi mamá por apoyarme de todas las formas posibles mientras estábamos lejos y que gracias a ella pude realizar un sueño que parecía inalcanzable. Perdón por perderme en el Picacho.

A mi abuela que me ayudó durante toda la carrera y estuvo al pendiente de mí, te quiero mucho.

A mi hermana que me ha hecho más fuerte y que nos hemos madrinado desde pequeñas.

A mi amiga Paty que desde que nos conocimos en el examen del D.F nos hicimos mejores amigas y que después de 5 años lo único que ha cambiado es que nos hemos hecho más unidas. Gracias por cuidarme cuando estoy enferma e ir a las presentaciones y sobre todo por todos los buenos recuerdos que hemos hecho juntas. Por ser mi familia lejos de casa.

A EVAC que han sido mi salvavidas en los peores momentos, me han enseñado que un grupo de personas puede estar unido sin malas competencias, apoyándose y queriéndose.

A mis amigos de La Laguna: Sara, Hazel, Cristina, Larissa y Yogui que aunque no estuvieron aquí conmigo siempre me apoyaron en mi sueño sin saber ni siquiera de que trataba la carrera, saben que soy su balita y cetáceo por siempre

A mis dos abuelos que me dieron una gran fascinación por el mar y una mente tan creativa para diseñar, que han sido las dos bases del amor por mi carrera.

A mi papá que me ayudó a ser más fuerte y a afrontar los retos de la vida. Además de mostrarme como ser un buen trabajador.

ÍNDICE GENERAL

I. Introducción.....	1
II. Antecedentes.....	4
III. Hipótesis.....	6
IV. Objetivo.....	6
IV.I Objetivo General	
IV.II Objetivos particulares	
V. Área de estudio.....	7
VI. Metodología.....	8
VI.I Análisis estadístico.....	10
VI.II Dispositivos evaluados.....	11
VI.II.I Aqua BuOY.....	12
VI.II.II Pelamis.....	13
VI.II.III Wave Dragon.....	14
VI.II.IV Oyster.....	15
VI.II.V Seawave Slot-cone Generator.....	16
VII. Resultados.....	17
VIII. Discusión.....	29
XI. Conclusión.....	35
X. Referencia.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Rosarito, Baja California.....	7
Figura 2. Esquema del dispositivo Aqua BuOY para la extracción de energía del oleaje....	12
Figura 3. Esquema del dispositivo Pelamis para la extracción de energía del oleaje. Panel superior vista lateral y panel inferior vista en planta.....	13
Figura 4. Esquema del dispositivo Wave Dragon para la extracción de la energía del oleaje. Panel superior vista lateral y panel inferior vista en planta.....	14
Figura 5. Esquema del dispositivo Oyster para la extracción de la energía del oleaje.....	15
Figura 6. Esquema del dispositivo SSG para la extracción de energía del oleaje.....	16
Figura 7. Tabla de distribución conjunta de la altura significativa y el periodo promedio del oleaje para la zona frente a la planta termoeléctrica en Rosarito B.C. de los años 1968 a 2014.....	17
Figura 8. Tabla de distribución conjunta de la altura significativa y el periodo asociado al pico espectral del oleaje para la zona frente a la planta termoeléctrica en Rosarito B.C. de los años 1968 a 2014.....	18
Figura 9. Promedio mensual de la altura significativa (A) y el periodo asociado al pico espectral (B) en la zona frente a la termoeléctrica en Rosarito, B.C. de los años 1968 a 2014.....	19
Figura 10. Promedio anual de la altura significativa (A) y el periodo asociado al pico espectral (B) en la zona frente a la termoeléctrica en Rosarito, B.C. de los años 1968 a 2014.....	20
Figura 11. Promedio mensual de energía extraída por metro de frente de onda de diferentes dispositivos analizados.....	21
Figura 12. Promedio mensual de energía total extraída para los diferentes dispositivos analizados.....	22
Figura 13. Matriz de eficiencia del dispositivo analizado Aqua BuOY, con una escala de colores que denota la potencia [kW] y contornos en negro marcando las isóneas de las matrices de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio.....	24
Figura 14. Matriz de eficiencia del dispositivo analizado Pelamis, con una escala de colores que denota la potencia [kW] y contornos en negro marcando las isóneas de las matrices de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio.....	25

Figura 15. Matriz de eficiencia del dispositivo analizado Wave Dragon, con una escala de colores que denota la potencia [kW] y contornos en negro marcando las isolneas de las matrices de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio.....26

Figura 16. Matriz de eficiencia del dispositivo analizado Oyster, con una escala de colores que denota la potencia [kW] y contornos en negro marcando las isolneas de las matrices de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio.....27

Figura 17. Matriz de eficiencia del dispositivo analizado SSG, con una escala de colores que denota la potencia [kW] y contornos en negro marcando las isolneas de las matrices de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio.....28

I. INTRODUCCIÓN

La energía del oleaje puede considerarse como una forma concentrada de la energía solar, ya que se ha originado porque el calentamiento diferencial de la Tierra genera los vientos que ceden parte de su energía al discurrir sobre la superficie del océano. La cantidad de energía transferida y, por consiguiente, el tamaño de las olas resultantes depende de la velocidad del viento, del tiempo durante el que sopla el viento, y de la extensión sobre las que sopla con la misma dirección e intensidad. De esta forma, unos niveles de energía solar típicos del orden de los 100 W/m^2 pueden transformarse en unas olas con un contenido energético de más de 1000 kW por metro de frente de ola (Miguélez-Pose, 2009).

Se ha demostrado que la densidad de potencia de un oleaje moderado a alto es suficiente como para ser aprovechada como energía renovable (González-Velasco, 2009). Además se estima que la fracción de la energía undimotriz potencialmente explotable es muy grande comparada con el consumo actual de electricidad en el mundo. Diversos estudios han estimado que el potencial explotable mundial, alrededor de 2 TWH/año , en Europa podría cubrir más del 50% del consumo total de energía (Uche, 2013). Los dispositivos ideados para convertir la energía del oleaje en electricidad hacen uso de diferentes características del movimiento de las olas. En general, para captar la energía que portan las olas es preciso utilizar una estructura que reaccione de forma adecuada a las fuerzas que sobre ella ejerzan las olas (González-Velasco, 2009).

En México, la Investigación y el Desarrollo Tecnológico en el campo de la energía oceánica debe iniciar con la evaluación del recurso y con el avance del conocimiento de las diferentes formas de aprovechar la energía del océano, a fin de poder definir una estrategia de desarrollo específica a esta fuente renovable. Es importante también incrementar sustancialmente los recursos humanos existentes. En estos momentos México no tiene una política específica para la energía del océano, sino que ésta se ubica dentro de las existentes para fomentar las energías renovables. No obstante, existen avances en esta materia, gracias a la iniciativa de instituciones de investigación y de sus interrelaciones con universidades y gobiernos internacionales (Estrada e Islas, 2010).

El litoral mexicano cuenta con una extensión de alrededor de 11 000 km, que no se han aprovechado adecuadamente. Aunque en los mares de México no existe un oleaje de gran intensidad como los que ocurren en las regiones extra tropicales, al Norte y Sur del planeta, se considera que el potencial energético del oleaje podría ser explotable (Aragón, *et al.*, 2009). Ya que, continuamente se están diseñando y ensayando nuevos dispositivos convertidores de la energía del oleaje en energía eléctrica (Uche, 2013).

En particular, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en Rosarito, Baja California, está trabajando en un proyecto de energía de oleaje, para fines múltiples: generación eléctrica, desalinización o una combinación de ambos (Estrada e Islas, 2010).

Rivera-Lemus *et al.*, (2013) realizaron simulaciones de la propagación del oleaje de aguas profundas hasta la zona de rompiente, en Playas de Rosarito.

Encontraron que durante el invierno y primavera, el intervalo de energía del oleaje oscila entre los 13 y 19 kW/m, mientras que en verano y otoño la energía del oleaje disminuye no sobrepasando los 13 kW/m. Las Islas Coronado frente a las costas del municipio de Rosarito actúan como sombra del oleaje generando en el Pacífico Extratropical Norte, lo que contribuye a que la energía cercana a la costa sea de menor intensidad, con valores entre 9 a 13 kW/m. En particular, se estima que la energía del oleaje frente a la costa del municipio de Rosarito, B.C varía entre 2 y 10 kW/m.

En este trabajo se evalúa la energía del oleaje en la zona frente a las instalaciones marítimas de la CFE, y se analiza el desempeño de 5 convertidores de la energía del oleaje en energía eléctrica para determinar el dispositivo comercial existente más eficiente para extraer la energía del oleaje.

II.ANTECEDENTES

El análisis estadístico del oleaje en las costas de Rosarito ha sido anteriormente estudiado con información obtenida de series de tiempo con medidores de oleaje.

Padilla-Hernández (1989) realizó un trabajo sobre la potencia, dirección y aprovechamiento del oleaje de la costa noroeste de la península de Baja California, utilizando datos de un sensor de presión de la CFE. En ese trabajo concluyó que el oleaje más energético proviene del noroeste, y que la distribución de la potencia del oleaje aumenta de octubre a febrero siendo este último mes el de mayor potencia con 25.5 kW/m en promedio.

Oropeza-Rosales (1998) describió el clima del oleaje en la costa de la Península de Baja California en el Océano Pacífico. Encontró valores máximos de las alturas como de las alturas significantes, durante las épocas de otoño e invierno, mientras que el periodo es más o menos constante durante todo el año. La dirección predominante del oleaje es del noreste durante el invierno y del sureste durante el verano, debido a la climatología que rige en la zona para estas épocas. Concluye que el oleaje dominante de esta zona es producto de las tormentas que ocurren en el Pacífico Norte. Para la época de invierno, el patrón de vientos predominante es del noroeste, el cual refleja su forzamiento sobre el océano produciendo direcciones sureste de propagación del oleaje; mientras que en primavera y verano hay marcada escases de eventos meteorológicos extremos. De acuerdo con sus resultados la energía del oleaje es máxima en el periodo de otoño e invierno.

Marichal-González (2001) hizo un análisis estadístico del oleaje frente a las costas de Rosarito, B.C de 1994 a 1998, en la cual caracterizo la zona de estudio como altamente dinámica, estacionalmente e interanualmente. Así mismo confirmó el impacto del fenómeno El Niño durante los inviernos de 1994-1995 y 1997-1998. La altura significativa con mayor frecuencia de ocurrencia es de 0.75 a 1.25 m, y el periodo de cruces por cero osciló entre 11 y 12 s.

Juárez-Díaz (2011) determino la energía disponible del oleaje, su variabilidad espacial y temporal en el océano pacífico. En el trabajo se estima la potencia del oleaje a partir de resultados obtenidos con la implementación de un modelo de simulación numérica del oleaje de tercera generación. Los mapas de distribución de energía del oleaje muestran claramente que la mayor riqueza energética, se encuentra de latitudes medias a altas, es decir entre $\pm 60^\circ$ y 30° , en ambos hemisferios, disminuyendo progresivamente mientras se reduce la distancia hacia el Ecuador. La costa Oeste de Estados Unidos, Alaska, Canadá y México reciben una mayor cantidad de energía del oleaje durante la temporada invernal.

Lizárraga- Arciniega et al., (2007) hizo un estudio sobre la alternancia de la playa relaciona con el oleaje en Rosarito, B.C. Analizó la influencia del oleaje con los cambios de volumen de arena. Los resultados mostraron que la fase constructiva o acrecional de la playa está definida durante el verano-otoño, cuando el oleaje es de menor altura, mientras que en la fase destructiva o erosional de la playa característica de invierno-primavera, cuando el oleaje es de mayor altura.

III. HIPÓTESIS

Es factible realizar la extracción de energía del oleaje en la zona frente a las instalaciones marítimas de la CFE de Playas de Rosarito con un dispositivo comercial existente.

IV. OBJETIVOS

IV.I Objetivo General

Determinar si es factible la extracción de energía y que tipo de dispositivo sería el más apto para hacerlo en la zona frente a las instalaciones marítimas de la CFE de Playas de Rosarito, Baja California, México.

IV.II Objetivos particulares

Determinar las características del oleaje y el potencial energético del oleaje en la zona frente a las instalaciones marítimas de la CFE de Playas de Rosarito, Baja California, México.

Determinar la energía extraíble de los dispositivos Aqua BuOY, Pelamis, Wave dragon, Oyster y el Seawave Slot-cone Generator.

V. ÁREA DE ESTUDIO

Rosarito se localiza en la costa noroeste de Baja California ($32^{\circ} 20' 32''$ N, $117^{\circ} 3' 22''$ W), 15 km al sur de la frontera México-EUA. La playa tiene una extensión de aproximadamente 11 km, en cuya parte central se localizan varios espigones de enrocamiento que conforman la toma de agua para el sistema de enfriamiento de una planta termoeléctrica, al norte la playa es relativamente angosta con cantiles, mientras que en el segmento sur la playa tiende a ser más ancha y los cantiles se desvanecen (Lizárraga-Arciniega *et al.*, 2008). El litoral de estudio para este proyecto es frente a la termoeléctrica Benito Juárez, donde Lizárraga-Arciniega, *et al.* (2007) registraron un oleaje de 1994 a 1999 con un comportamiento estacional en la altura significativa, con valores de 1.3 a 2.1m en invierno y 1.0 a 1.3m en verano.

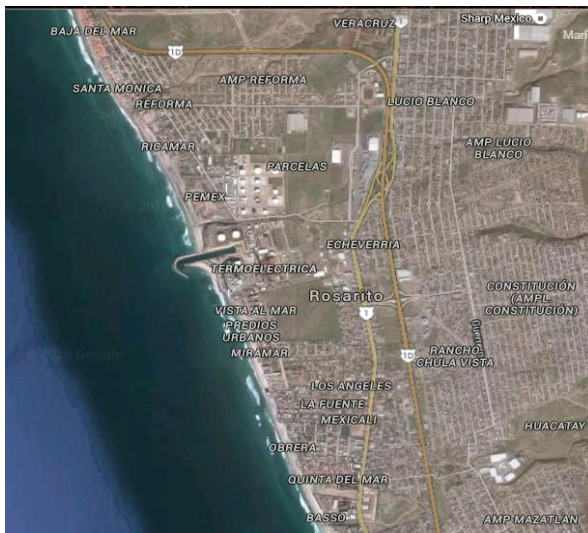


Figura 1. Mapa de Rosarito, Baja California.

VI. METODOLOGÍA

La energía del oleaje potencialmente extraíble se determinó a partir de una simulación numérica del oleaje de los años 1968 a 2014 realizada como parte del proyecto pe-oleajePBC. Para las simulaciones numéricas se implementó el modelo WAM ciclo 4.5 (Komen *et al.*, 1996) en todo el Pacífico, con una resolución de $1^\circ \times 1^\circ$ y forzado con vientos del re análisis NCEP/NCAR (Saha *et al.*, 2010). Adicionalmente, se realizó un anidamiento con el modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999) para crear una malla de alta resolución frente a la costa de Rosarito donde se alcanzó una resolución espacial de 100 m. Los datos simulados se validaron usando los datos de las boyas disponibles para la zona.

El oleaje de la zona de estudio se caracterizó a través de matrices de distribución conjunta de altura significativa y periodo, mismas que se combinaron con las matrices de eficiencia de cinco dispositivos extractores de energía para determinar cuál de ellos podría ser más adecuado. Las matrices potenciales de los dispositivos analizados se obtuvieron de Silva *et al.* (2013). Se crearon dos tipos de tablas de distribución con los datos de oleaje, una con el periodo promedio y la otra con el periodo asociado al pico espectral ya que algunas de las matrices potenciales de los dispositivos están expresadas como función del periodo promedio y otras como función del periodo asociado al pico espectral.

La potencia obtenible con cada dispositivo P_T se calculó como

$$P_T = \sum_i \sum_j Pd_{i,j} N_{i,j}$$

Donde los subíndice i y j son los índices matriciales, N es la matriz de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio, Pd es la matriz potencial del dispositivo

$$Pd_{i,j} = Pw_{i,j}\eta_{i,j}$$

Pw es la matriz de potencia del oleaje y η es la matriz adimensional de eficiencia del dispositivo.

Adicionalmente se estudiaron las características y limitaciones de los cinco convertidores comerciales estudiados para determinar qué tan factible sería su implementación en el área de estudio.

VI.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para determinar la disponibilidad y variabilidad del potencial energético del oleaje en la zona de estudio se realizaron promedios anuales y mensuales. La variabilidad del potencial energético se caracterizó a partir de la variabilidad media anual VMA y la variabilidad inter-anual VIA calculadas como (Stopa *et al.*, 2013)

$$VMA = \overline{\left(\frac{\sigma_j}{\bar{x}_j}\right)}$$

$$VIA = \frac{\sigma_{\bar{x}_j}}{\bar{x}}$$

Donde σ es la desviación estándar, \bar{x} es el valor promedio, el subíndice j hace referencia a valores anuales y la barra denota el promedio.

Así mismo, para determinar las características del oleaje en la zona de estudio, se realizaron matrices de distribución conjunta de altura significativa (H_s) y periodo del oleaje, tanto del periodo asociado al pico espectral (T_p) como promedio (T_{m02}) por periodos anuales y mensuales.

Con la información generada sobre las características del oleaje se determinó la eficiencia de cada uno de los dispositivos estudiados. Para calcular el potencial energético obtenible con cada convertidor se utilizaron las matrices potenciales de los dispositivos descritas por Silva *et al.* (2013) junto con las matrices de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio.

VI.II DISPOSITIVOS EVALUADOS

Desde 1970, siguiendo la crisis de petróleo, ha habido una búsqueda por energías renovables, una de ellas es la conversión de energía del oleaje a eléctrica. Actualmente, existen muchos diseños de convertidores, de los cuales se han desarrollado y probado algunos pero aún se encuentran en la fase de prototipos (Hong *et al.*, 2014).

La energía del oleaje es muy dinámica ya que puede aprovecharse en diferentes direcciones. Puede mover flotadores en sentido vertical, horizontal y rotacional, en aguas poco profundas se aprovecha de manera horizontal mediante flotadores o estructuras fijas. Una estructura semi-sumergida puede captar la energía del mar mediante medios mecánicos o neumáticos, asimismo se puede aprovechar la variación de la presión causada por el oleaje, por debajo de la superficie del agua (Ormaza, 2012).

En este trabajo se analiza el desempeño de 5 convertidores comerciales existentes: Aqua BuOY, Pelamis, Wave dragon, Oyster y el Seawave Slot-cone Generator. Estos aparatos fueron elegidos ya que cubren toda la escala de tipos de convertidores de energía, usando los movimientos verticales como horizontales, presión, almacenamiento de agua, cerca o fuera de la costa.

A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de ellos.

VI.II.I AQUA BUOY

El dispositivo Aqua BuOY consiste en un tubo sumergido en una masa de agua, en el cual un pistón reacciona al cambio de altura producido por el movimiento de las olas. Cuando las olas pasan, el pistón reacciona actuando como un compresor presionando el agua a entrar, el agua entonces es encaminada a un acumulador hidráulico donde se contiene la presión, para finalizar la presión es libera en una turbina interna a un generador eléctrico (Jarocki, 2010).

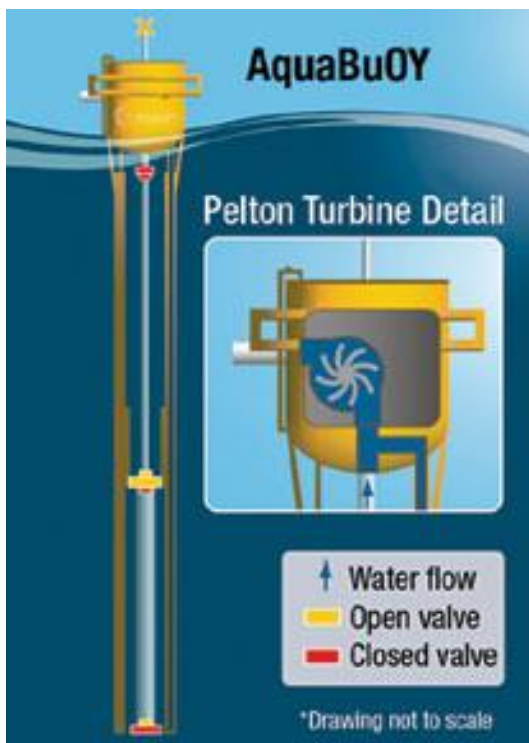


Figura 2. Esquema del dispositivo Aqua BuOY para la extracción de energía del oleaje.

VI.II.II PELAMIS

El Pelamis es un dispositivo flotante, fuera de la costa, que convierte la energía de las olas a energía eléctrica. Consta de cuatro cilindros semi sumergidos horizontalmente unidos por bisagras que tienen acumuladores de alta presión conectados a un generador eléctrico (Henderson, 2006).

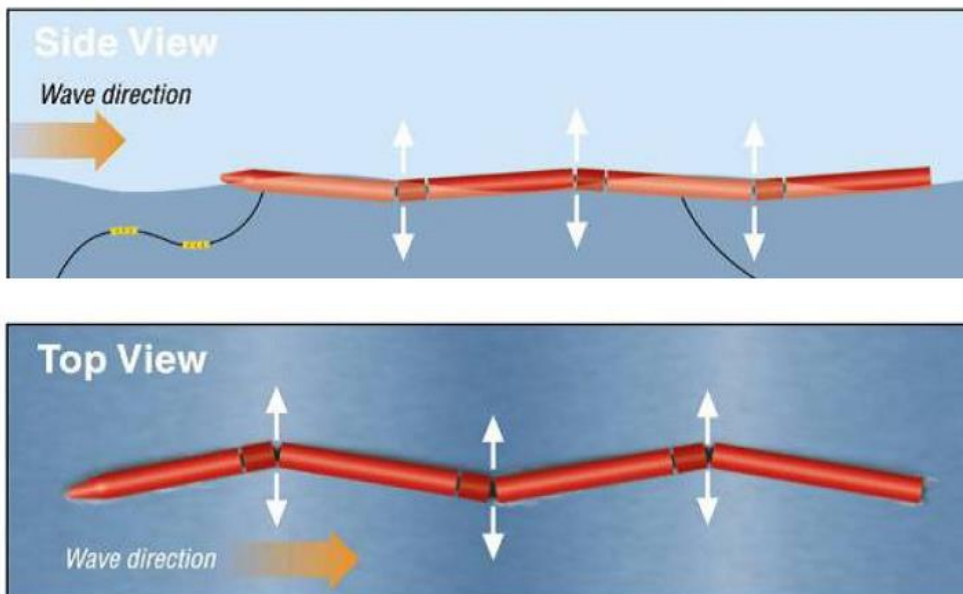


Figura 3. Esquema del dispositivo Pelamis para la extracción de energía del oleaje. Panel superior vista lateral y panel inferior vista en planta.

VI.II.III WAVE DRAGON

El Wave Dragon es un dispositivo anclado fuera de la costa, a profundidades entre 25 y los 40 m. El dispositivo es una estructura flotante con dos brazos para reflejar el oleaje hacia el interior de la estructura principal, la cual consiste en una rampa doblemente curvada y una reserva de agua, para ser pasada por unas turbinas que convierten la energía hidráulica a electricidad (Kofoed *et al.*, 2006).

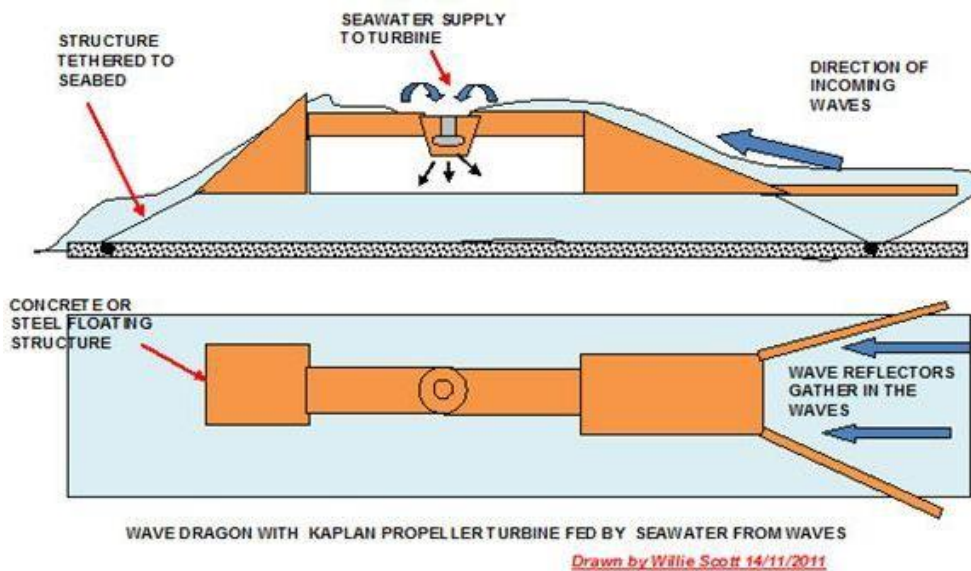


Figura 4. Esquema del dispositivo Wave Dragon para la extracción de la energía del oleaje. Panel superior vista lateral y panel inferior vista en planta.

VI.II.IV OYSTER

El Oyster es un dispositivo costero, que aprovecha toda la columna de agua. Su funcionamiento consiste en que la fuerza de las olas sobre la estructura impulsa a pistones hidráulicos que bombean presionando agua a la planta hidroeléctrica en tierra firme. En la planta eléctrica se convierte la energía hidráulica a energía eléctrica a través de una turbina pelton, al ser un circuito cerrado, el agua regresa al mar través de una segunda tubería de baja presión (Cameron *et al.*, 2010).

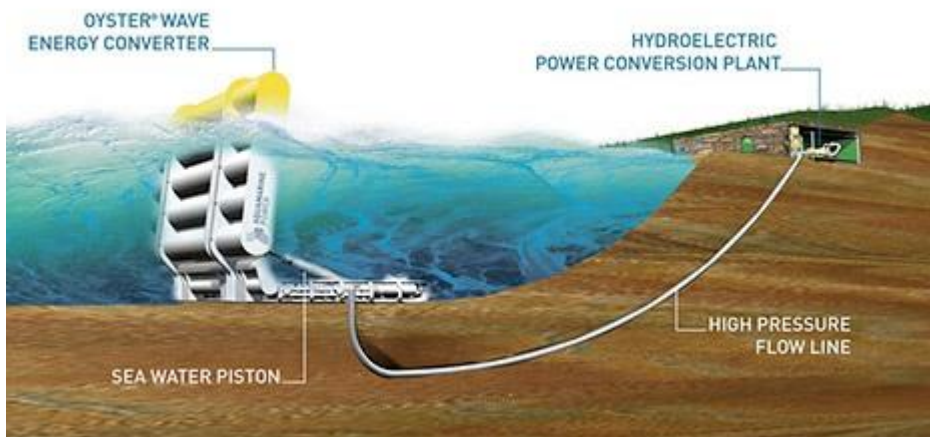


Figura 5. Esquema del dispositivo Oyster para la extracción de la energía del oleaje.

VI.II.V SEAWAVE SLOT-CONE GENETATOR

El último dispositivo es el Seawave Slot-cone Generator (SSG), este funciona utilizando un número de reservas de agua colocadas una encima de otra, en las cuales la energía de las olas entrantes se almacena como energía potencial. El agua captada en los embalses corre a través de una turbina de varias etapas para producir la energía eléctrica. Este puede instalar cerca, dentro o incluso fuera de la costa, (Vicinanza *et al.*, 2012).

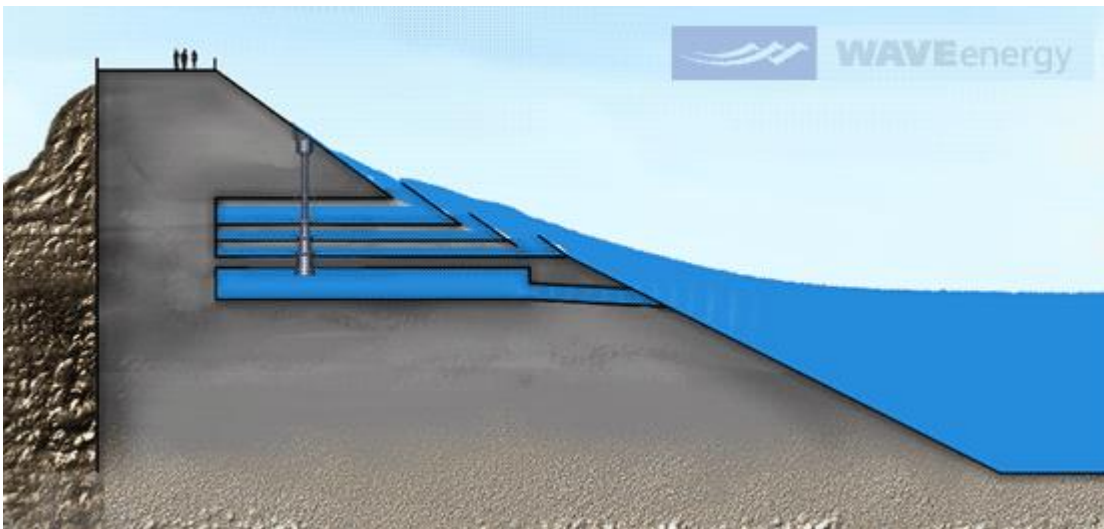


Figura 6. Esquema del dispositivo SSG para la extracción de energía del oleaje.

VII. RESULTADOS

Las figuras 7 y 8 muestran las matrices de distribución conjunta de la altura significativa con el periodo promedio y con el periodo asociado al pico espectral, respectivamente. En ellas se resume el tipo de oleaje existente en Rosarito. Como se observa, la altura significativa más frecuente es de alrededor de 1 m y se encuentra asociada a periodos promedio de 6 s y periodo asociados al pico espectral de 13 s.

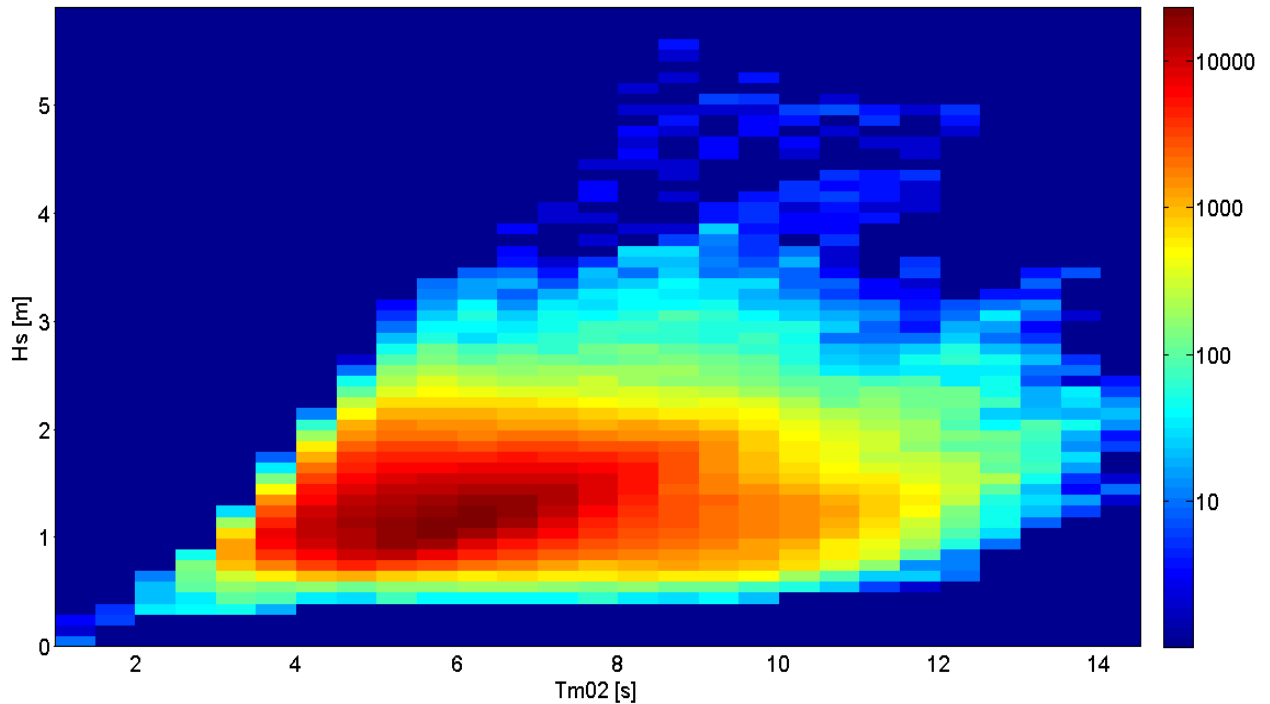


Figura 7. Tabla de distribución conjunta de la altura significativa y el periodo promedio del oleaje para la zona frente a la planta termoeléctrica en Rosarito B.C. de los años 1968 a 2014.

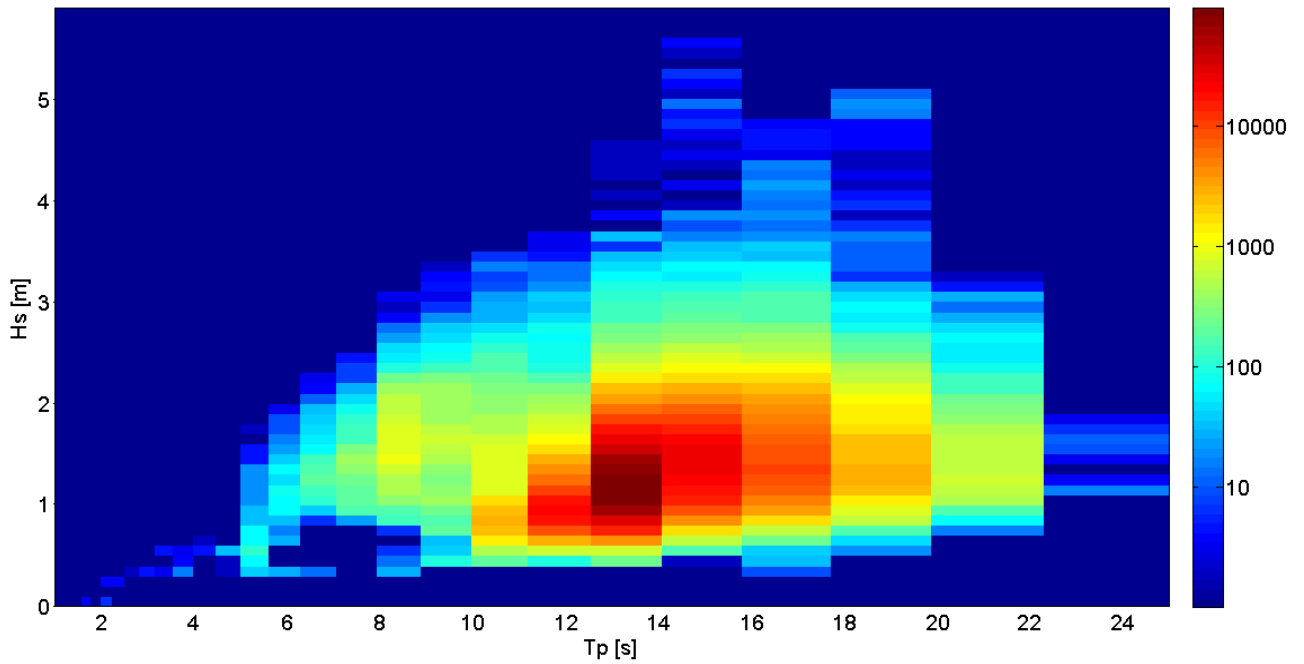


Figura 8. Tabla de distribución conjunta de la altura significativa y el periodo asociado al pico espectral del oleaje para la zona frente a la planta termoeléctrica en Rosarito B.C. de los años 1968 a 2014.

La variabilidad temporal de la altura significativa presentó un comportamiento estacional evidente, con valores mayores en los meses de invierno y menores en verano (A). En cambio el periodo asociado al pico espectral es más constante variando solamente entre 13.5 y 14s (B). Con los datos mensuales se obtuvo una variabilidad media anual de 27% para la altura significativa y de 12% para el periodo. Mientras que la variabilidad inter-anual es de 7% de altura significativa y solamente del 2% del periodo (Figura 10).

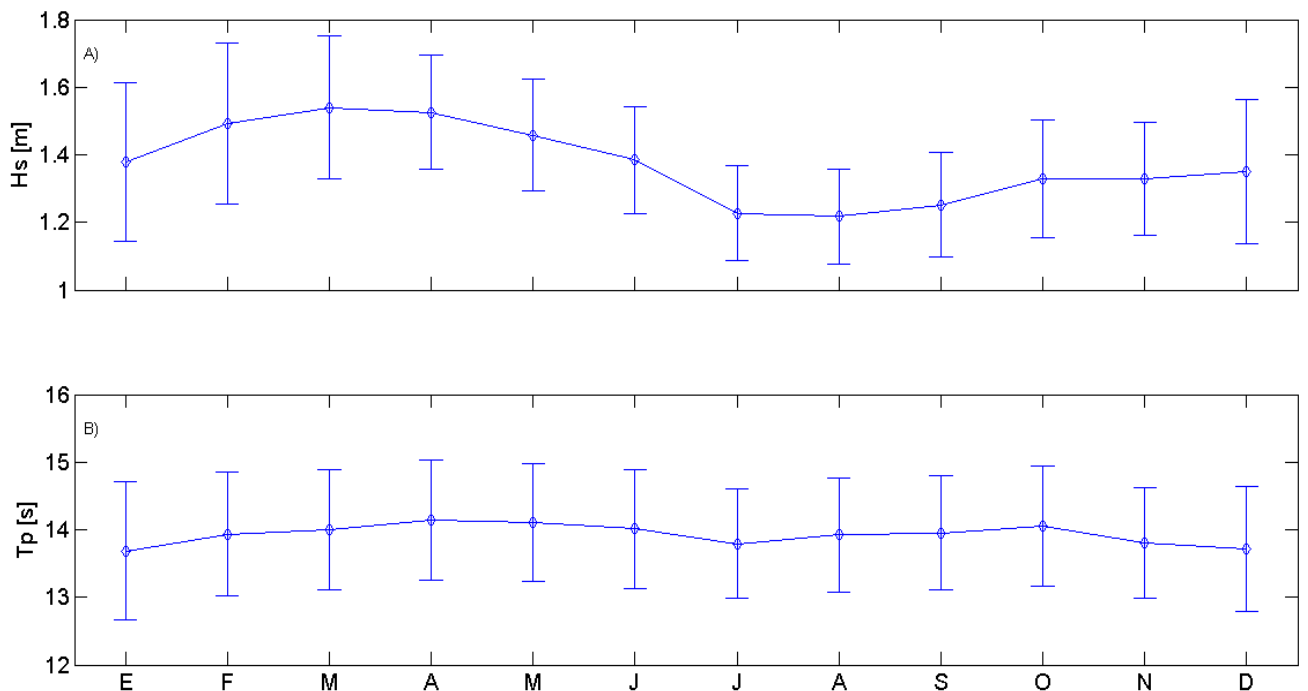


Figura 9. Promedio mensual de la altura significativa (A) y el periodo asociado al pico espectral (B) en la zona frente a la termoeléctrica en Rosarito, B.C. de los años 1968 a 2014.

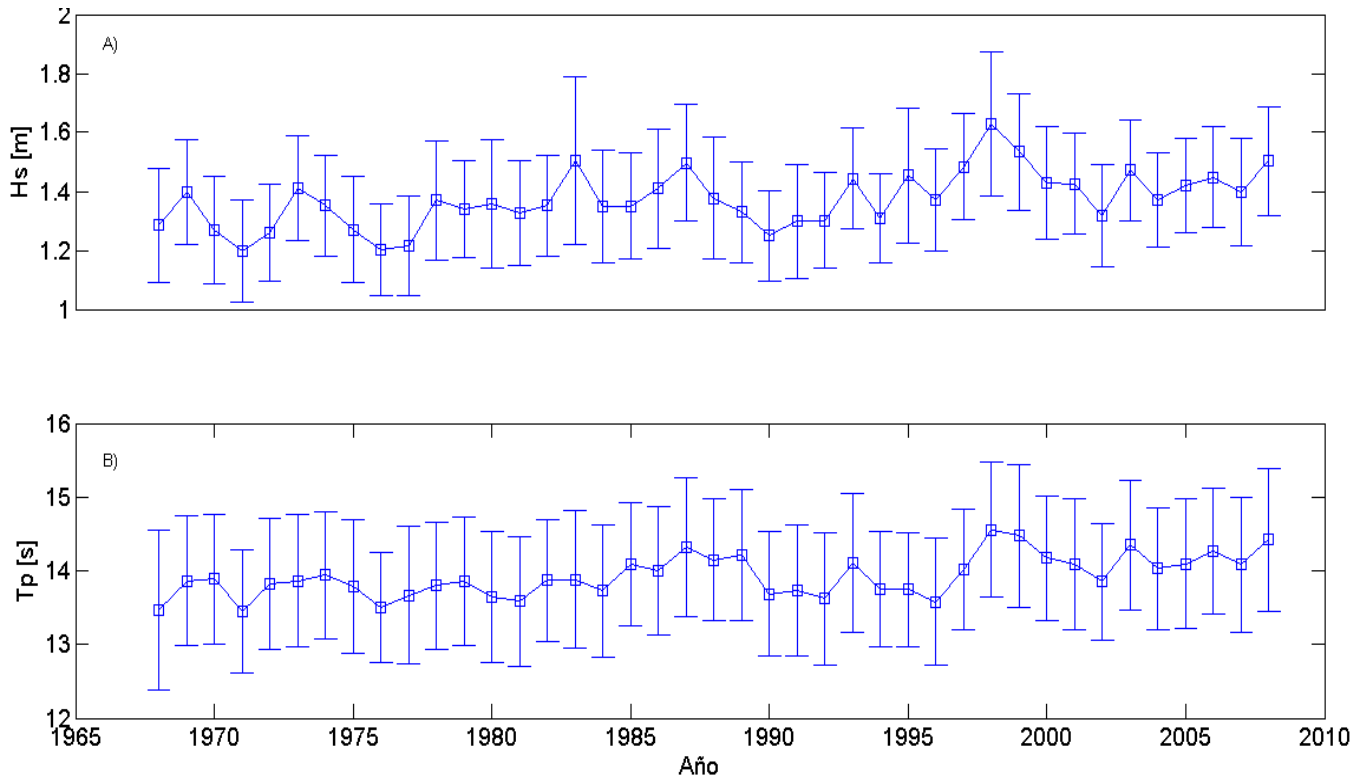


Figura 10. Promedio anual de la altura significante (A) y el periodo asociado al pico espectral (B) en la zona frente a la termoeléctrica en Rosarito, B.C. de los años 1968 a 2014.

El comportamiento estacional del oleaje hace que la extracción de energía con los dispositivos tenga un comportamiento similar, presentando mayores valores de energía extraída en invierno y menores en verano. Para comparar la eficiencia de cada dispositivo los resultados fueron estandarizados con las dimensiones del dispositivo para que fueran kW por metro de frente de ola. El dispositivo SSG mantiene los valores más altos con un promedio de 1.5 kW/m durante el año y una variabilidad de 0.5 kW/m, mientras que el Pelamis se mantiene en el valor de 1 kW/m con una variabilidad de aproximadamente 0.2 kW/m. Los dispositivos Wave dragon, Oyster y Aqua BuOY son los dispositivos con menor producción potencial y un comportamiento más constante con valores aproximadamente de 0.4, 0.3 y 0.2kW/m, respectivamente (Figura 11).

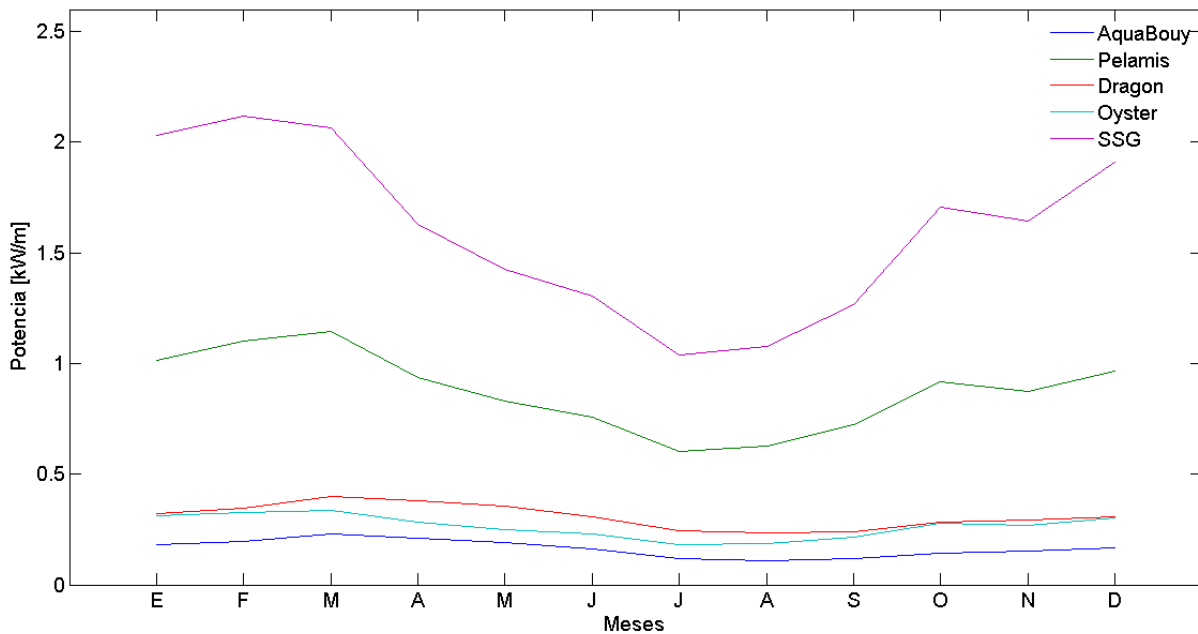


Figura 11. Promedio mensual de energía extraída por metro de frente de onda de diferentes dispositivos analizados.

Sin considerar las dimensiones de los dispositivos para el cálculo de la energía obtenida, la producción de energía del SSG mantiene su comportamiento estacional, con un valor promedio de 70 kW y variaciones de 20 kW, el segundo mejor dispositivo Wave dragon con un valor de 40 kW y variaciones de 10 kW. Los dispositivos Oyster, Pelamis y Aqua BuOY tienen valores aproximadamente de 7, 5 y 1 kW, con pequeñas variaciones (Figura 12).

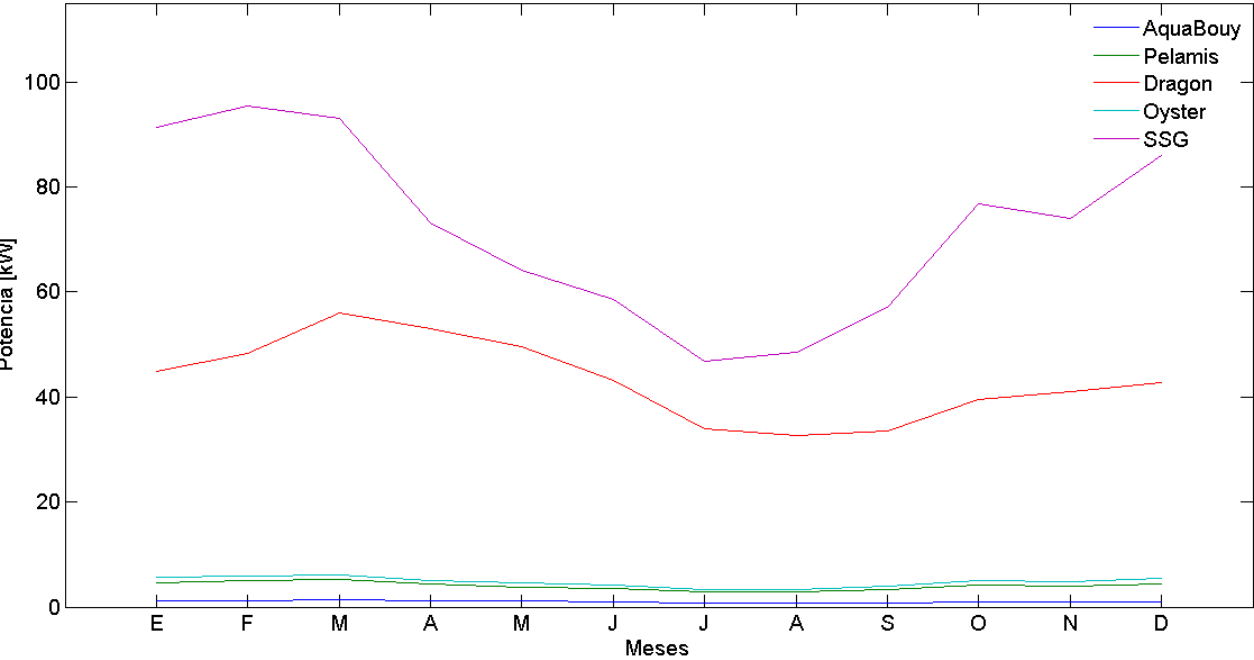


Figura 12. Promedio mensual de energía total extraída para los diferentes dispositivos analizados.

En las Figuras 13-17 se pueden observar las matrices potenciales de cada dispositivo, éstas representan la cantidad de energía que puede extraer el dispositivo de acuerdo a las características del oleaje. En la figura también se muestran los contornos de frecuencia de ocurrencia del oleaje en el área de estudio. La eficiencia de un dispositivo estará dada en la medida en que los contornos de frecuencia de ocurrencia abarquen zonas donde la matriz de eficiencia del dispositivo presenta valores altos. Como se observa en la figura 13 el Aqua BuOY los contornos se encuentran en los valores más bajos, los dispositivos Pelamis (figura 14) y Wave dragon (figura 15) los contornos se encuentran en los valores bajos a intermedios bajos, en Oyster (figura 16) los valores bajos a intermedios altos y por último el SSG (figura 17) los contornos se acercan a los valores más bajos. Por otro lado, como se puede observar las matrices potenciales no tienen los mismos valores, esto nos dice que en algunos casos aunque el contorno este en los valores bajos en un dispositivo en otro dispositivo estos pueden ser los valores altos.

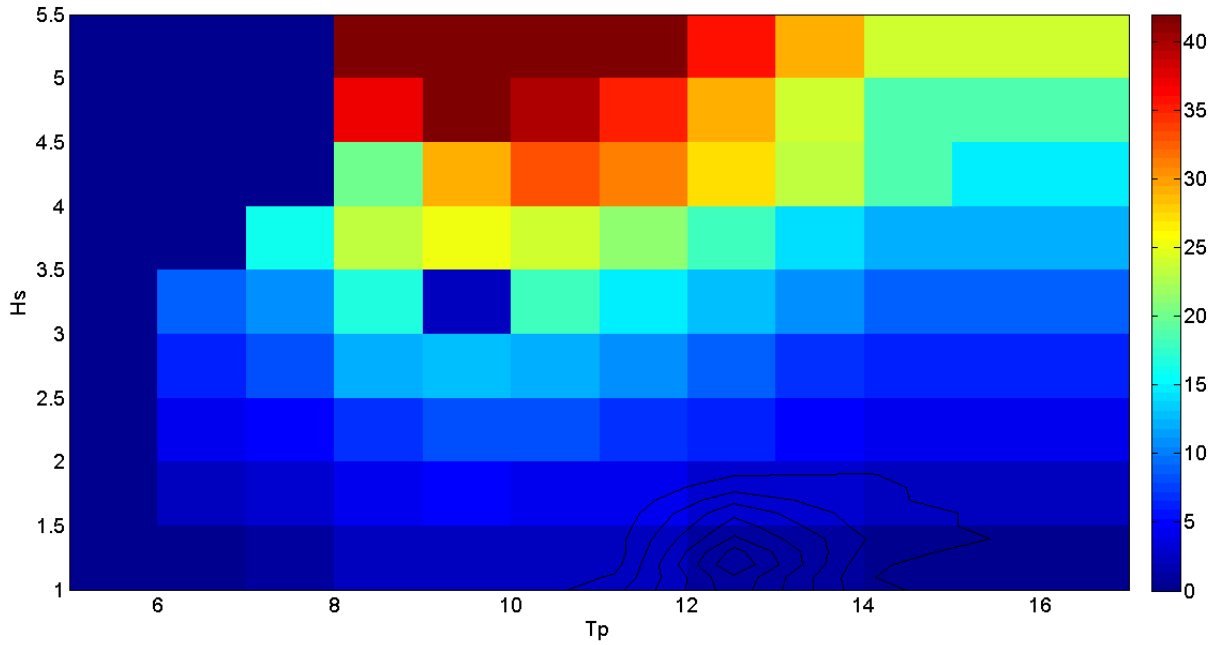


Figura 13. Matriz de eficiencia del dispositivo analizado Aqua BuOY, con una escala de colores que denota la potencia [kW] y contornos en negro marcando las isolíneas de las matrices de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio.

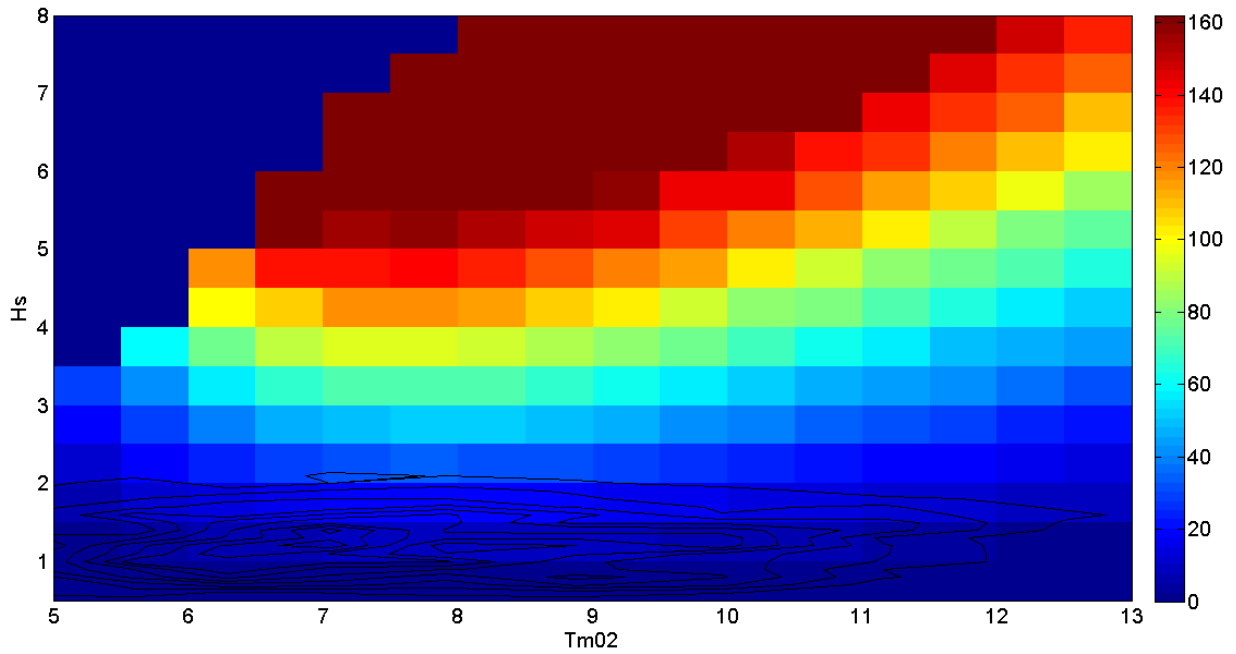


Figura 14. Matriz de eficiencia del dispositivo analizado Pelamis, con una escala de colores que denota la potencia [kW] y contornos en negro marcando las isolíneas de las matrices de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio.

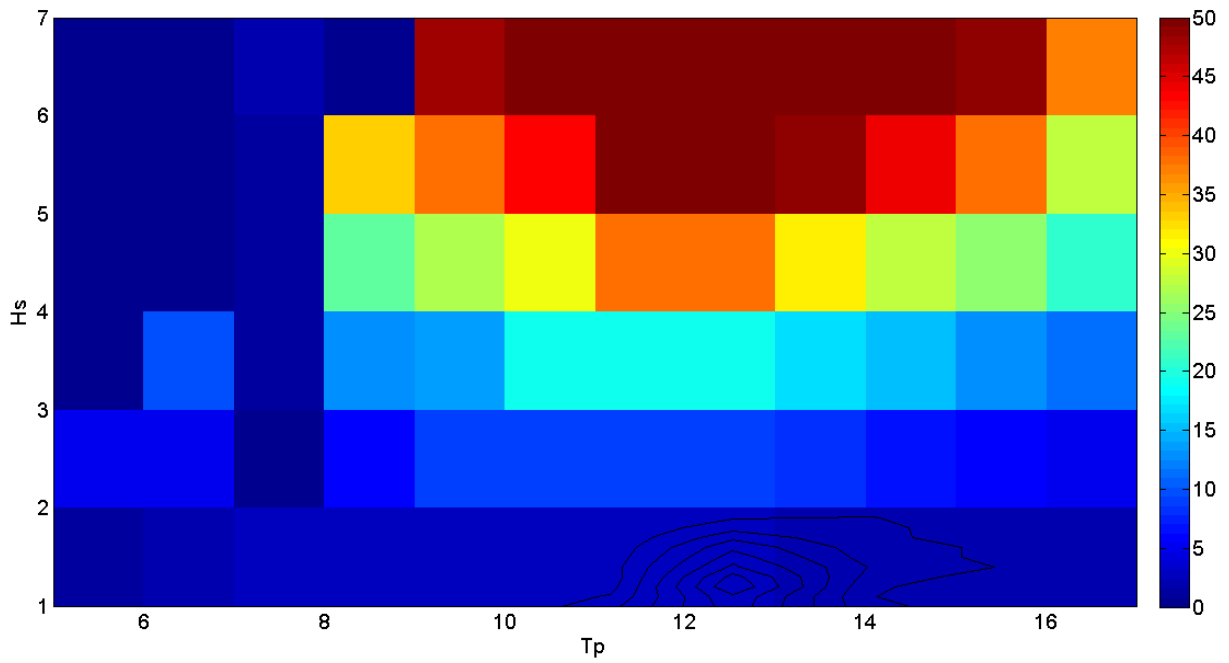


Figura 15. Matriz de eficiencia del dispositivo analizado Wave Dragon, con una escala de colores que denota la potencia [kW] y contornos en negro marcando las isolíneas de las matrices de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio.

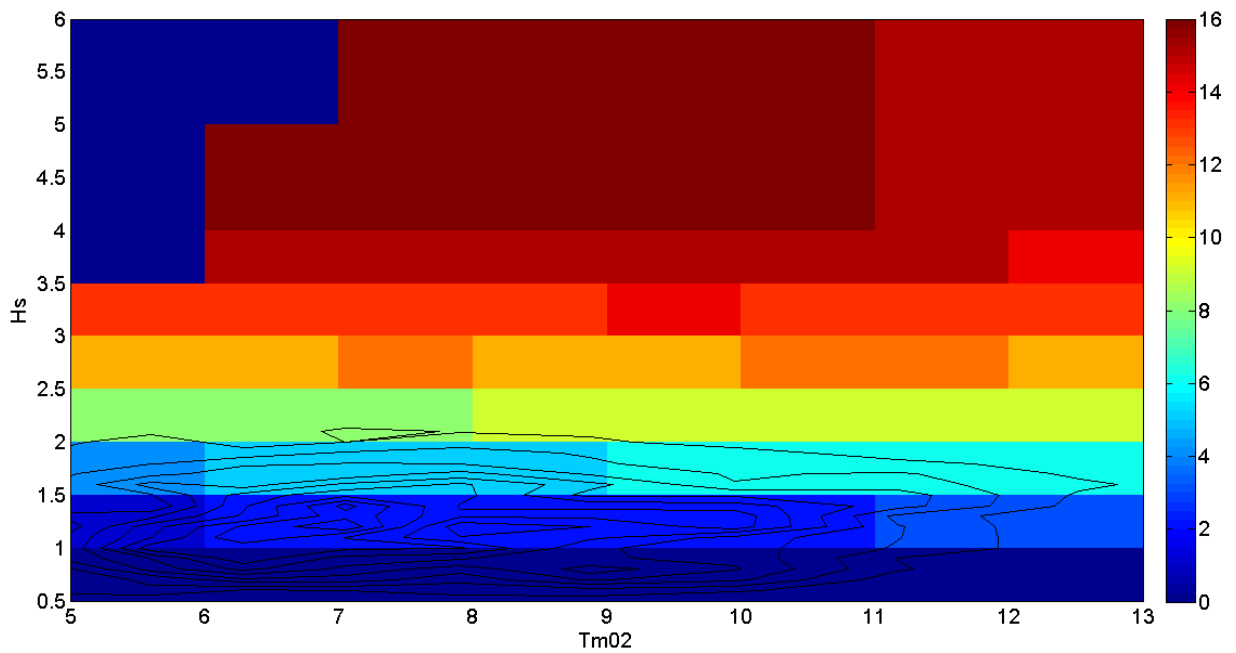


Figura 16. Matriz de eficiencia del dispositivo analizado Oyster, con una escala de colores que denota la potencia [kW] y contornos en negro marcando las isolíneas de las matrices de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio.

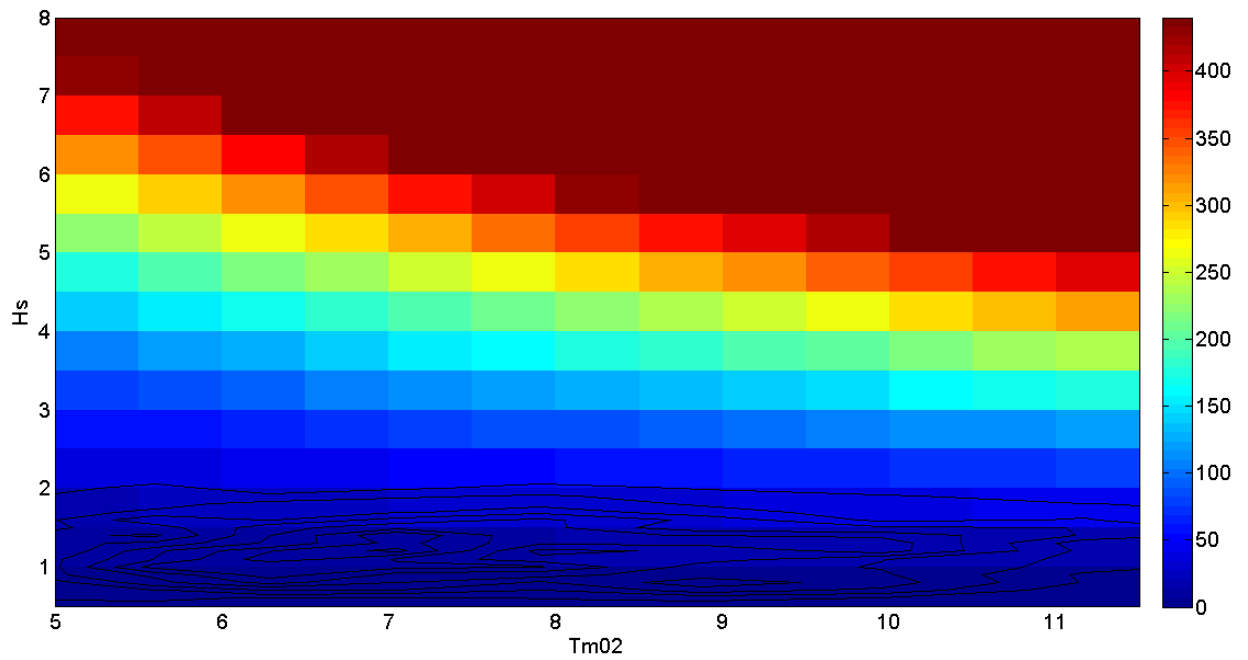


Figura 17. Matriz de eficiencia del dispositivo analizado SSG, con una escala de colores que denota la potencia [kW] y contornos en negro marcando las isolíneas de las matrices de distribución conjunta del oleaje en el área de estudio.

VIII. DISCUSIONES

De acuerdo con los resultados de la figura 9 la estacionalidad del oleaje es muy marcada, esto coincide con los resultados de Marichal- Gonzalez (2001) y Lizágarra-Arciniega, *et al.* (2007). Aunque dichos autores solo presentan datos de 4 años, observan el mismo patrón estacional de la altura significativa observado en este estudio. En la figura 10 el comportamiento interanual muestra ciertos picos más perceptibles en la altura significativa entre 1980-1985 y 1995-2000. Sielfeld *et al.* (2010), identifican las ocurrencias más fuertes en condiciones de El niño e identifican los años de 1972-1973 como Niño fuerte y los años 1982-1983 como Niño muy fuerte. El primero es poco perceptible en nuestros resultados ya que el promedio de altura en esos años es muy cercano al resto, aun así se puede observar un aumento de la altura y una mayor variabilidad; el segundo periodo el aumento de la altura es más perceptible presentando una alta variabilidad llegando casi a los 2m de altura, por otro lado el periodo pareció mantenerse constante. El valor máximo anual más perceptible de la altura significativa ocurre alrededor del año 1998, donde incluso se observa un aumento en el periodo. Esta época coincide con las condiciones de El Niño 1997-1998, considerado como el más intenso del siglo, el cual provocó tormentas violentas, vientos intensos y lluvias torrenciales, con olas de hasta 10 metros en Baja California (Capel-Molina, 1999).

Las características de cada dispositivo le confieren ciertas ventajas y desventajas dependiendo del sitio de extracción, por eso es necesario no solo considerar la cantidad de energía que extraen, sino tomar en cuenta otras

variables que pueden ser representativas para la colocación y operación del dispositivo. Hay que tomar en cuenta que ninguno de los dispositivos presenta su mejor eficiencia en los valores más comunes del oleaje presente en Rosarito. Esto se observa en las figuras 13 a 17 donde es notable que los contornos de ocurrencia del oleaje están en los valores más bajos de eficiencia de los dispositivos. Por lo tanto es necesario buscar distintos dispositivos que puedan tener una mejor eficiencia con las características del oleaje observadas en este trabajo.

El Aqua BuOY es un dispositivo parecido a una boya que necesita como mínimo una profundidad de 50 metros además, está construido de manera que se tiene que calcular la presión que causaran las olas más frecuentes y solo podrá tomar la energía de este tipo de olas (Jarocki, 2010). Según nuestros resultados el Aqua BuOY es el dispositivo que menor energía obtiene, tanto en producción de energía total como por metro de frente de ola (figuras 11 y 12). Aunque el pistón se puede manipular para que sea más eficiente con el oleaje más frecuente en Rosarito, esto sería poco práctico, ya que el oleaje tiene un comportamiento estacional y por lo tanto se tendría que cambiar el pistón durante todo el año para optimizar la extracción de energía. Por otro lado, existe el problema de la profundidad a la que debe instalarse, según la batimetría de Riviera-Lemus *et al.* (2013) frente a la planta presidente Juárez en Rosarito la profundidad de 50m se encuentra aproximadamente a 11 km mar adentro, lo que significa que el cable de transmisión de electricidad tendría que medir más de 11 km. Elegir este aparato significaría un alto costo de transmisión y de en mantenimiento y una baja cantidad de energía.

El Pelamis, tiene cuatro secciones tubulares interconectadas con un pistón con el cual se extrae la energía. En nuestros resultados se muestra como es el cuarto dispositivo en producción de energía total, muy por debajo del SSG y el Wave dragon, y el segundo más eficiente al considerar la energía extraída por metro de frente de ola. Este tipo de aparato se instala en profundidades alrededor de los 50 m. El dispositivo está diseñado para ser conectado con cables eléctricos a otro Pelamis para así crear un campo o “granja” de extracción de energía, el cable de conducción eléctrica termina en el fondo marino para llevarlo a tierra, para sí transportar la energía extraída (Henderson, 2006). Según nuestros resultados con un solo Pelamis obtendríamos una producción constante de energía de alrededor de 4 kW, tomando en cuenta que se puede hacer una red de ellos la producción puede aumentar considerablemente. Sin embargo, hay que tomar en consideración que si se crea una red, se debe crear un área alrededor de ellos, ya que los dispositivos además de estar flotando tienen cables de conexión entre ellos que podrían ser maltratados por los barcos o lanchas que pasen cerca. La creación de un área restringida, puede conllevar un aumento del costo de instalación además de quitar espacio portuario y obstaculizar la navegación. Al igual que el Aqua BuOY, el Pelamis requeriría de un cable de conducción eléctrica de unos 11 km que involucra un alto costo de transmisión de la energía a tierra.

El Wave Dragon es un dispositivo con dos grandes brazos que reflejan el oleaje hacia el centro del aparato donde se utilizan varias turbinas Kaplan para producir la energía. Para su instalación se necesitan mínimo 25 metros de profundidad y tiene un ancho de 140 m. En las figuras 11 y 12 el Wave

Dragon fue el segundo más eficiente en producción de energía total y el tercero más eficiente en extracción de energía por metro de ola. Utilizando este dispositivo, se obtendría gran cantidad de energía tanto en invierno como en verano, además que la profundidad que requiere hace más viable su colocación en Rosarito, ya que la longitud del cable de conducción se disminuiría a la mitad en comparación con los dispositivos que requieren 50 m de profundidad, disminuyendo la inversión necesaria para su instalación y mantenimiento. La desventaja de este dispositivo es que no se ha hecho un modelo a escala real, aunque se han hecho pruebas de dispositivos a escala en el mar que confirman las hipótesis hechas en los laboratorios. Además actualmente se está trabajando en una sincronización para que pueda ser manipulado desde tierra y hacerlo más eficiente dependiendo de las condiciones (Kofoed *et al.*, 2006).

El Oyster Wave Energy, es un modelo único ya que se diseñó para ubicarse muy cerca de la zona costera con una base en el fondo y penetrando por completo la columna de agua, además tiene la ventaja de tener la hidroeléctrica en la costa (Cameron *et al.*, 2010). En las figuras 11 y 12 es el tercero en producción de energía total y el cuarto en eficiencia en extracción de energía por metro de ola, además tiene un comportamiento muy constante, lo que nos indica que puede ser una buena opción, ya que estaría cercano a la costa y la planta Presidente Juárez podría tomar energía directamente de la costa frente a ella. Otro beneficio es que toda la hidroeléctrica podría estar dentro de la termoeléctrica, sin necesidades de cables de conducción, además que serviría como un atenuador de las olas dando protección a la planta. La desventaja es que aun siendo el tercero de

los dispositivos evaluados, tiene una producción promedio de apenas 5 kW, siendo un valor tan bajo que tal vez no sea redituable al analizar la relación costo y beneficio.

El último dispositivo es el SSG, el cual tiene una forma en pendiente y se coloca normalmente en la costa. Este dispositivo utiliza un número de reservas puestas una sobre otra para capturar el agua que llega por acción del oleaje, posteriormente el agua corre a través de unas turbinas que generan la energía; su funcionamiento es mejor en la costa donde las olas rompen (Vicinanza *et al.*, 2012). En la figura 11 y 12 se puede apreciar que es el más eficiente para nuestras playas, aun así se tiene que tomar en cuenta que los valores en kW/m pueden ser no reales ya que en Silva *et al.* (2013) no se mencionan las medidas exactas del dispositivo considerando. De acuerdo con Vicinanza *et al.* (2012) el tamaño más usado para la construcción de este dispositivo es el de 45 m de frente, por lo que se usó tamaño como referencia. En la figura 17 los valores más elevados de energía se encuentran a alturas significantes mayores a los 5m, a diferencia de 1 m en la que se encuentran los valores más bajos. El dispositivo tiene un comportamiento estacional con variaciones de 20 kW y resultados de casi 100 kW en invierno. Una desventaja de este dispositivo es que se necesita una pendiente abrupta y la configuración batimétrica de la zona cercana a la zona presenta una pendiente suave (Appendini-Albrechtsen, 1995). De acuerdo con Vicinanza *et al.* (2012) dependiendo de la pendiente de la playa y el oleaje incidente se puede modificar el diseño del SSG para optimizar la extracción de la energía. Algunas ventajas de este dispositivo son que no necesita mucho

mantenimiento, no requiere cables sumergidos y permite una circulación de agua natural.

Debido a los altos costos de diseño, construcción, instalación, mantenimiento y prueba de dispositivos, se requiere un programa que apoye la investigación y desarrollo con recursos del estado, hasta que esta tecnología alcance la madurez y el costo sea competitivo con otras formas de generación de energía (Rance & Guba).

IX. CONCLUSIONES

El oleaje más frecuente en la zona costera de Rosarito tiene una altura significativa alrededor de 1 m, un periodo promedio de 6 s y un periodo asociados al pico espectral de 13 s. El oleaje presenta una clara estacionalidad con máximos de la altura significativa en invierno, que se reflejan en un comportamiento estacional en la obtención de energía eléctrica a partir de este. Su variabilidad interanual es baja, sin embargo, en condiciones de El Niño la altura significativa de las olas aumenta, dependiendo de la intensidad del mismo.

Los principales problemas tecnológicos que enfrenta el desarrollo de dispositivos extractores de energía del oleaje incluyen: diseño estructural, la variabilidad temporal del recurso, los altos costos de instalación y mantenimiento, el impacto ambiental y el mecanismo de transmisión de la energía generada.

Los dispositivos con mayores valores en extracción de energía por oleaje frente a las instalaciones marítimas de la CFE de Playas de Rosarito son SSG y Wave dragon. Con estos dispositivos se pueden obtener en promedio 70 y 40 kW, respectivamente, las desventajas de estos dispositivos son que el Wave Dragon aún es un prototipo y no ha sido probado a una gran escala, mientras que el SSG requeriría un gran costo de inversión además que no se tiene un valor exacto del tamaño necesario para obtener la energía calculada en este trabajo. Se considera necesario evaluar más dispositivos con diseños más apropiados para las características del oleaje y del ambiente en la zona de estudio.

X. REFERENCIA

- Appendini-Albrechtsen, C.M. 1995. Aplicación de un modelo numérico para la estimación de volúmenes de azolve en la central termoeléctrica de Rosarito, B.C. Tesis de Licenciatura Facultad de Ciencias Marinas UABC., pp
- Aragón, F., Bautista, E., Escandon, J. 2009. Extracción de Energía del Oleaje a Través de un Resonador Cilíndrico. XI Congreso Nacional de Ingeniería electromecánica y de sistemas. México, D.F, Noviembre. 2 pp.
- Booij, N., Ris R.C. Holthuijsen L.H., 1999, A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J. Geoph. Research, 104, C4, 7649-7666.
- Cameron, L., Doherty, R., Henry, K., Van't Hoff, J. Kaye, D., Naylor, D. 2010. Desing of the next generation of the Oyster Wave Energy Converter. 3rd Internacional Conference on Ocean Energy, 6 Octobres, Bilbao. 1-12pp.
- Capel Molina, J. J. 1999. El fenómeno ENSO (El Niño. Oscilación del sur) en 1997-1998: alteraciones climáticas inducidas en el mundo. *Nimbus: Revista de climatología, meteorología y paisaje*, 3:37-62.
- Estrada, C. e Islas, J. 2010. Energías Alternas: Propuesta de Investigación y Desarrollo Tecnológico para México. Editorial Academia Mexicana de Ciencias. 1ra Edición. 91 pp.
- Gonzáles-Velasco, J. 2009. Energías renovables. Editorial Reverte. 1ra Edición. 487 pp.

- Henderson, R. 2006. Design, simulation and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter. *Renewable Energy*, 31:271–283.
- Hong, Y., Waters, R., Bostrom, C., Eriksson, M., Engstrom, J., Leijon, M. 2014. Review on electrical control strategies for wave energy converting systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31:329–342.
- Jarocki, D. 2010. Wave energy converter performance modeling and cost of electricity assessment. The Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo. 20-25 pp.
- Juárez Díaz, T.I. 2011. Determinación de la energía disponible del oleaje y su variabilidad espacial y temporal en el Océano Pacífico. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México.
- Kofoed, J., Frigaard, P., Friis-Madsen, E., Sorensen, H. 2006. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. *Renewable Energy*, 31:181-189.
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M. A., Hasselmann, K., Hasselmann, S., y Janssen, P. A. E. M. 1996. Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press. 530 pp.
- Lizárraga-Arciniega, J. R., Martínez-Díaz-de-León, A., Torres-Navarrete, C. R., y Galindo-Bect, L. A. 2008. Multiannual shoreline response along the coast of Rosarito, Baja California, *Ciencias Marinas*, 34(4), 513-521.
- Lizárraga-Arciniega, R. L., Chee-Barragán, A., Gil-Silva, E., Mendoza-Ponce, T., De Leon, A. M. D. (2003). Effect of El Niño on the subaerial

beach Playas de Rosarito, BC, Mexico. *GEOFISICA INTERNACIONA*, 42(3): 419-428.

- Lizágarra-Arciniega, R. Martínez-Díaz de León, A. Delgado-González, O. Torres, CR. Galindo-Bect, L. A. 2007. Alternancia de los ciclos de erosión/acreción de playa relacionados con el oleaje en Rosarito, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 33(3): 259–269.
- Marichal-González, A. M. 2001. *Análisis estadístico del oleaje medido frente a las costas de Rosarito, BC, de 1994 a 1998*. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México.
- Miguélez-Pose, F. 2009. La energía que viene del mar. Editorial Netbiblo. 1ra Edición España. 53 pp.
- Ormaza, M. A. 2012. La energía renovable procedente de las olas. *.Ikastorratza, e-Revista de didáctica*, (8), 1-14.
- Oropeza-Rosales, F. 1998. Descripción del clima del oleaje para las costas Mexicanas del Océano Pacífico en los estados de Baja California, Colima, Michoacán y Guerrero. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México.
- Padilla-Hernández, A. 1989. Potencia y dirección del oleaje en la costa noroeste de la península de Baja California y su aprovechamiento. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México.
- Rance, L. y Guba, K. Problemáticas y recomendaciones sobre las tecnologías de aprovechamiento de energías oceánicas. Laboratorio de ingeniería y procesos costeros. Instituto de ingeniería UNAM.

- Riviera-Lemus, E.R., Osuna, P., García, B. I. 2013. Mapas del recurso “Energía del oleaje”: Resultado de las simulaciones numéricas con escala local (modelo swan). Fondo sectorial sustentabilidad energética S0019-2009-01. Determinación del potencial energético del oleaje en la costa de la Península de Baja California (pe-olejePBC). Proyecto 119798.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., y Reynolds, R. W. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8): 1015-1057.
- Sielfeld, W., Laudien, J., Vargas, M., Villegas, M. (2010). El Niño induced changes of the coastal fish fauna off northern Chile and implications for ichthyogeography. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 45(1): 705-722.
- Silva, D., Rusu, E., y Guedes Soares, C. 2013. Evaluation of Various Technologies for Wave Energy Conversion in the Portuguese Nearshore. *Energies*. 6, 1344-1364.
- Uche, J.2013. La energía en el agua. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza. 68 pp.
- Vicinanza, D., Margheritini, L., Kofoed, J., Buccino, M. 2012. The SSG wave energy converter: Performance, status and recent developments. *Energies*,5:193-226.