



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**ANÁLISIS BENCHMARK DE DISTINTOS CONVERTIDORES DE
ENERGÍA DEL OLEAJE PARA LA COSTA OCCIDENTAL DE BAJA
CALIFORNIA.**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE OCEANÓLOGO

PRESENTA

GERMÁN BARRERA MARTÍNEZ

ENSENADA B.C. 21 JUNIO del 2019

**" ANÁLISIS BENCHMARK DE DISTINTOS CONVERTIDORES DE ENERGÍA
DEL OLEAJE PARA LA COSTA OCCIDENTAL DE BAJA CALIFORNIA."**

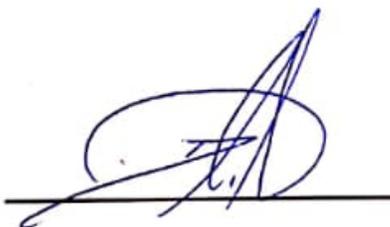
TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE OCEANÓLOGO

PRESENTA

GERMÁN BARRERA MARTÍNEZ

Aprobada por:



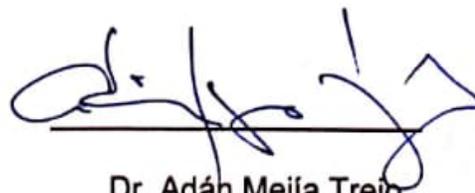
M.C. Luis Felipe Navarro Olache
Director



Dr. Rafael Hernández Walls
Sinodal



Dr. Héctor García Nava
Sinodal



Dr. Adán Mejía Trejo
Sinodal

Resumen

La energía contenida en las olas es un recurso que puede ser capturado y aprovechado por medio de dispositivos con distintos diseños y principios de funcionamiento. Baja California con cerca de 800 km de litoral en su costa Occidental, se presenta como un área de desarrollo para la extracción y aprovechamiento del potencial energético del oleaje. En este trabajo se realiza un análisis "benchmark", a lo largo del litoral occidental de Baja California mediante una selección de 8 dispositivos.

Se estimó la potencia extraíble de cada aparato en 10 sitios a lo largo de la costa occidental de Baja California, caracterizados a través de parámetros de disponibilidad de energía, desempeño e indicadores económicos. Los resultados muestran que el sitio Isla Guadalupe, presentó el mayor estimado anual de potencial energético con un flujo de energía de 26.7 kW/m de frente de ola, con un promedio de altura de ola de 2.13 m y periodo de 13.16 s y valores máximos de altura de ola de 2.47 m durante el mes de Diciembre y periodo de 14.7 s durante el mes de Enero. La Isla de Cedros presentó el coeficiente de variabilidad (COV) más bajo con 0.74, lo que sugiere que el arribo del oleaje es más estable. Además, este sitio se presentó como uno de los mejores para extracción de energía, con un potencial energético anual de 19.4 kW/m. De acuerdo a las características de oleaje de la región se encontró que el dispositivo con mayor potencia anual extraíble fue el sistema *Oyster* con 346.3 kW (Isla Guadalupe) y 176.5 kW en promedio de todos los sitios.

Palabras clave: convertidores energía oleaje, Baja California, oleaje, potencial energético, benchmarking.

*A mi padre:
héroe siempre presente y ejemplo a seguir.*

*A mi madre:
mujer de humanidad y paciencia a quién debo todo.*

*Y a todos aquellos que,
desde su trinchera reinventan el mundo.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi director de tesis, mentor y amigo Luis por todo el apoyo y paciencia que me brindo durante la realización y revisión de este trabajo. Grande con los tips de revés.

Mis sinceros agradecimientos a mi sinodal Dr. Héctor García por la paciencia en cual fuera la duda expresada, por las correcciones y sugerencias, y por todas las enseñanzas acerca del oleaje.

A mi sinodal Dr. Rafael Hernández Walls por todas las pláticas y consejos, por la pasión y ánimo con la que enseña y toma todo proyecto.

A mi sinodal Dr. Adán Mejía Trejo por todos los valiosos comentarios respecto a este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Baja California y en especial a la Facultad de Ciencias Marinas por ser mi Alma máter, hogar durante esta etapa. Así mismo al Club Científico Universitario y al Grupo de oleaje de CICESE, por los útiles comentarios y sugerencias.

A mi familia: grande mi padre, de tesón y talante generoso, a mi madre, mi salvadora en los momentos más oscuros, a mi hermana singular personita de carácter antagónico en ocasiones, pero que siempre me pone los pies en la tierra.

A los amigos que dejé en Playas, personajes petrificados a través del tiempo que a pesar de la distancia siempre estuvieron presentes.

A mis amigos y segunda familia que encontré o me encontraron en este bello puerto, cómplices de aventuras y porque no también algunas desventuras. Por respeto a no errar nombrándolos a todos, lo dejo a su consideración, ustedes saben quiénes son.

Contenido

1. Introducción	1
2. Antecedentes	5
2.1. Energías oceánicas	5
2.2. Energía de las olas	6
3. Hipótesis	8
4. Objetivos	8
4.1. Objetivos Generales	8
4.2. Objetivos Particulares	8
5. Área de estudio	9
6. Metodología	10
6.1. Oleaje	12
6.2. Sitios	13
6.3. Análisis estadístico	14
6.3.1. Variabilidad	14
7. Dispositivos Analizados	16
7.1. <i>Sea-based buoy</i>	16
7.2. <i>Ceto buoy</i>	18
7.3. <i>Wavebob</i>	20
7.4. <i>Wavestar</i>	22
7.5. <i>Pontoon Power Converter</i>	24
7.6. <i>Oyster</i>	26
7.7. <i>Langlee</i>	28
7.8. <i>OE buoy</i>	30
8. Resultados	32
8.1. Sitios	32
8.2. Dispositivos CEO	45
9. Discusiones	64
9.1. Sitios	64
9.2. Dispositivos CEO	66
9.2.1. Parámetros de desempeño	69
9.2.2. Indicadores de costos	70
9.2.3. Demanda energética en Baja California	72
9.2.4. Impacto ambiental	73
10. Conclusión	75
Referencias	76
Anexos	82

Lista de figuras

Figura 1. Dispositivos situados fuera de la costa, sumergidos ó flotantes; cerca de la costa flotantes o situados en el fondo marino; y sobre la línea de costa.....	3
Figura 2. Dispositivos de acuerdo a su forma y orientación respecto al oleaje: a) Captador puntual; colectan energía en todas direcciones, tamaño reducido en comparación longitud de onda, b) Atenuadores; estructuras largas, paralelos a dirección ola, c) Totalizadores ó terminadores; perpendiculares a la dirección de ola, sujetos a mayor energía efecto terminador en las olas.	3
Figura 3. Distintos principios de captación de la energía de las olas.....	3
Figura 4. Ubicación de los nodos de oleaje, en el área de estudio.....	9
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología utilizada en el presente trabajo.....	15
Figura 6. Imagen y esquema del funcionamiento del dispositivo <i>Sea-based</i> (Babarit et al., 2012; <i>SeaBased AB</i> , 2019)	17
Figura 7. Imagen y esquema del funcionamiento del dispositivo <i>Ceto</i> (Carnegie Clean Energy, 2019).....	19
Figura 8. Imagen y esquema del dispositivo <i>Wavebob</i> . Se observan las dimensiones y partes del sistema, así como un dispositivo a escala 1:4 en funcionamiento en la Bahía de Galway, Irlanda (Mouwen, 2008; Weber et al., 2014).	21
Figura 9. Selección de esquemas e imágenes del dispositivo <i>WaveStar</i> . En la imagen superior izquierda se observa el dispositivo en fase de supervivencia, en las imágenes inferiores en operación (<i>Wave Star A/S</i> , 2019).....	23
Figura 10. Selección de imágenes del concepto del dispositivo <i>Pontoon Power Converter</i> (<i>Pontoon Power</i> , 2012).....	25
Figura 11. Selección de imágenes del dispositivo <i>Oyster</i> . Las imágenes superiores e inferior izquierda corresponden a las características del <i>Oyster</i> utilizado en este estudio, la imagen inferior derecha corresponde al <i>Oyster2</i> (Babarit et al., 2012; E. Renzi, Doherty, Henry, & Dias, 2014).....	27
Figura 12. Selección de imágenes y esquemas del dispositivo <i>Langlee</i> . Las imágenes superiores representan al dispositivo <i>Langlee</i> con las dimensiones y características utilizadas en este trabajo, mientras que en los esquemas inferiores el <i>Langlee Robusto</i> (<i>Langlee Wave Power AS</i> , 2013).....	29
Figura 13. Selección imágenes y esquemas del concepto del dispositivo <i>Ocean Energy buoy(OE)</i> (Falcao & Henriques, 2016).....	31
Figura 14. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por H_s y T_p en el sitio Campo López. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.	33
Figura 15. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por H_s y T_p en el sitio Isla Todos Santos. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.	34

Figura 16. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio El Retiro. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.	35
Figura 17. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio Santo Tomás. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.	36
Figura 18. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio Eréndira. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.	37
Figura 19. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio Colonet. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.	38
Figura 20. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio Isla San Martín. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.	39
Figura 21. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio El Rosario. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.	40
Figura 22. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio Isla Guadalupe. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.	41
Figura 23. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio Isla Cedros. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.	42
Figura 24. Promedios mensuales de potencial energético para cada uno de los sitios propuestos.	43
Figura 25. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Campo López.	49
Figura 26. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Isla Todos Santos.	49
Figura 27. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio El Retiro.	50
Figura 28. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Santo Tomás.	50
Figura 29. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Eréndira.	51
Figura 30. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Colonet.	51

Figura 31. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Isla San Martín.	52
Figura 32. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio El Rosario.	52
Figura 33. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Isla Guadalupe.	53
Figura 34. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Isla Cedros.	53
Figura 35. Resultados del Factor de capacidad (Fc) para los dispositivos <i>Sea-based</i> , <i>Ceto</i> , <i>Wavebob</i> y <i>Wavestar</i> . En la primera columna y de color amarillo se presentan los valores totales de Fc, en la segunda columna y de color azul se presentan los valores de Fc para invierno. Los estimados se presentan en porcentajes (%).	55
Figura 36. Resultados del Factor de capacidad (Fc) para los dispositivos <i>Pontoon</i> , <i>Oyster</i> , <i>Langlee</i> y <i>OE buoy</i> . En la primera columna y de color amarillo se presentan los valores totales de Fc, en la segunda columna y de color azul se presentan los valores de Fc para invierno. Los estimados se presentan en porcentajes (%).	56
Figura 37. Resultados de Ancho de captura (Ac) para los dispositivos <i>Sea-based</i> , <i>Ceto</i> , <i>Wavebob</i> y <i>Wavestar</i> . En la primera columna y de color naranja se presentan los valores de Ac totales, en la segunda columna y de color púrpura se presentan los valores de Ac para la estación de invierno. Los estimados se presentan en metros (m).	57
Figura 38. Resultados de Ancho de captura (Ac) para los dispositivos <i>Pontoon</i> , <i>Oyster</i> , <i>Langlee</i> y <i>OE buoy</i> . En la primera columna y de color naranja se presentan los valores de Ac totales, mientras que en la segunda columna y de color púrpura se presentan los valores de Ac para la estación de invierno. Los estimados se presentan en metros (m).	58
Figura 39. Resultados de la razón de ancho de captura (η_1) para los dispositivos <i>Sea-based</i> , <i>Ceto</i> , <i>Wavebob</i> y <i>WaveStar</i> . En la primera columna y de color verde-azul se presentan los valores de (η_1) anuales, mientras que en la segunda columna y de color verde oscuro se presentan los valores de (η_1) para la estación de invierno. Los estimados se presentan en porcentajes (%).	59
Figura 40. Resultados de la razón de ancho de captura (η_1) para los dispositivos <i>Pontoon</i> , <i>Oyster</i> , <i>Langlee</i> y <i>OE buoy</i> . En la primera columna y de color verde-azul se presentan los valores de (η_1) totales, mientras que en la segunda columna y de color púrpura se presentan los valores de (η_1) para la estación de invierno. Los estimados se presentan en porcentaje (%).	60
Figura 41. Resultados del promedio anual de potencia extraíble. La escala de colores representa los distintos dispositivos, mientras que en los ejes se muestran los valores obtenidos para cada sitio. Los valores estimados van de 0.1 a 350 kW.	61
Figura 42. Resultados del parámetro indicador de costo de la relación que existe entre la producción energética anual (kWh) por unidad de masa dada en kilogramos. La escala de colores representa los distintos dispositivos,	

mientras que en los ejes se muestran los valores obtenidos para cada sitio.
Los valores estimados van de 0.1 a 1.1 kWh/kg. 62

Figura 43. Resultados del parámetro indicador de costo de la relación que existe
entre la producción energética anual (MWh) por área sumergida del aparato
dada en m². La escala de colores representa los distintos dispositivos,
mientras que en los ejes se muestran los valores obtenidos para cada sitio.
Los valores estimados van de 0.1 a 1.5 MWh/kg..... 63

Lista de tablas

Tabla I. Coordenadas de los sitios propuestos.	13
Tabla II. Representación de base de datos de oleaje.	13
Tabla III. Coeficiente de variabilidad, variabilidad estacional y variabilidad mensual para cada uno de los sitios propuestos.....	44
Tabla IV. Potencial energético anual estimado para cada uno de los sitios propuestos.....	44
Tabla V. Características principales de los CEO analizados.....	48
Tabla VI. Resultados de potencia anual extraíble de cada convertidor de energía del oleaje, evaluados con condiciones de oleaje presentes en los distintos sitios propuestos. Valores estimados en kW.....	54
Tabla VII. Diversos tipos de generación de energía eléctrica en Baja California y en México (GWh). Fuente: CFE (s/a), Estadísticas por entidad federativa (sector eléctrico nacional) en (Muñoz-Melendez et al., 2012).....	85

1. Introducción

La energía aprovechable proveniente de las olas no es una noción reciente. Hace siglos se conocía el gran potencial que los océanos del mundo poseen para proporcionar vastas cantidades de energía. En el contexto actual donde la demanda creciente de fuentes energéticas, y la degradación ambiental por el uso irresponsable de energías tradicionales como los combustibles fósiles, son problemas prioritarios y se requieren realizar una serie de cambios de paradigmas.

Históricamente las zonas marítimas han representado crecimiento económico, comercio, desarrollo de tecnologías y son sitios competitivos en el contexto de las energías renovables (Rusu & Onea, 2016). El oleaje es un recurso energético que se encuentra disponible alrededor del mundo. Cerca del 40% de la población mundial vive en un radio de 100 km o menos de la costa (United Nations, 2017). La mayor cantidad de energía se encuentra disponible sobre las costas occidentales de los continentes y en latitudes medias 30° - 60° de ambos hemisferios (Alonso, Solari, & Teixeira, 2015). Sitios con alto valor potencial de energía undimotriz se localizan en Europa (Escocia, Irlanda, Holanda, Portugal), en Norteamérica (Columbia Británica, Washington, Oregón, California) en Sudamérica (Chile Brasil y Argentina), y en Oceanía (Australia, Nueva Zelanda) (Castillo Villagra, Segovia Barros, Díaz Flores, & Araya Medina, 2018; Kim et al., 2012).

Las costas mexicanas colindan con dos grandes océanos, el Pacífico; que a su vez comprende el Golfo de California y Golfo de Tehuantepec; y el Atlántico que comprende el Golfo de México y Mar Caribe. De acuerdo a la estimación de potencial energético en diversos nodos a lo largo de las costas mexicanas (González-Ramírez, et al. 2017) los nodos de oleaje situados en el Pacífico presentan un mayor potencial undimotriz.

La evaluación de la energía disponible es un prerrequisito para la correcta planeación estratégica para el aprovechamiento del recurso y para el diseño del

más adecuado de dispositivos para captar esta clase de energía. La caracterización de la climatología del oleaje usualmente se ha llevado a cabo para otros propósitos, como la navegación, la ingeniería oceánica: costera y fuera de la costa (Falcão, 2010).

A diferencia de dispositivos eólicos ó solares, existe una amplia variedad de tecnologías para captar energía de las olas. De acuerdo a EMEC existen cerca de 226 desarrolladores registrados de energía undimotriz en todo el mundo (European Marine Center, 2017). La clasificación más utilizada para dispositivos de acuerdo a sus diferentes características es la sugerida por Drew, Plummer, & Sahinkaya, 2009; Falcão, 2010. Esto es de acuerdo a su principio de operación, forma u orientación respecto al oleaje, así como la ubicación del dispositivo en el océano; ya sea en la línea de costa, cerca de la línea de costa o en mar abierto. Los dispositivos ubicados cerca de la costa tienen la ventaja de tener costos de mantenimiento relativamente más bajos, además de estar más cercanos a poblaciones por lo que disminuirían costos en el transporte de energía, en comparación a un dispositivo en aguas profundas. La ventaja de los Convertidores de Energía del Oleaje (CEO) para aguas profundas es que están ubicados en un sitio con mayor potencial energético, sin embargo, son más costosos para instalar y mantener, además que tienen que resistir durante eventos extremos (Robertson, 2010). En las figuras 1,2 y 3 se explican los principales tipos de clasificaciones de los sistemas CEO.

Otras clasificaciones pueden ser por el uso dado a la energía obtenida: electricidad para suministro de red, bombeo de agua para desalación, agua para refrigeración, suministro agua o electricidad para sistemas en acuicultura. En menor uso, de acuerdo a la potencia nominal, al grado de desarrollo (prototipo, investigación y desarrollo, ó semi-comercial,) y al sistema de toma de Fuerza, por sus siglas en inglés (PTO).

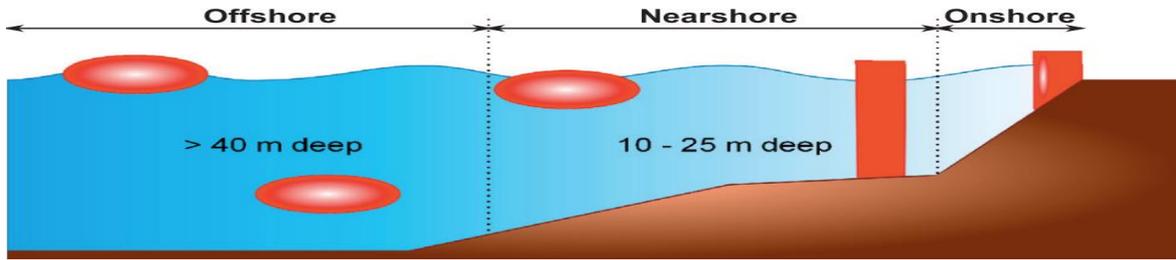


Figura 1. Dispositivos situados fuera de la costa, sumergidos ó flotantes; cerca de la costa flotantes o situados en el fondo marino; y sobre la línea de costa.

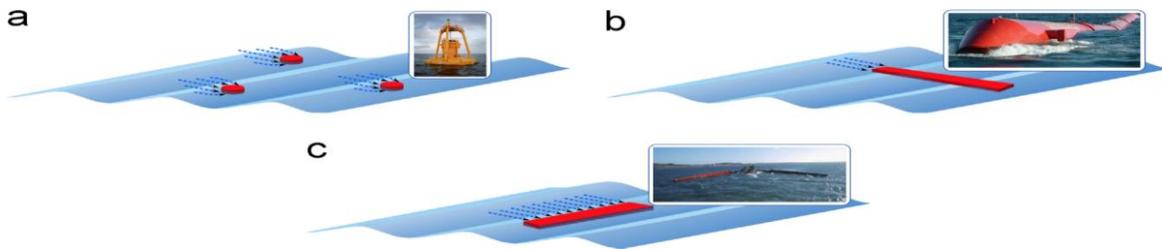


Figura 2. Dispositivos de acuerdo a su forma y orientación respecto al oleaje: a) Captador puntual; colectan energía en todas direcciones, tamaño reducido en comparación longitud de onda, b) Atenuadores; estructuras largas, paralelos a dirección ola, c) Totalizadores ó terminadores; perpendiculares a la dirección de ola, sujetos a mayor energía efecto terminador en las olas.

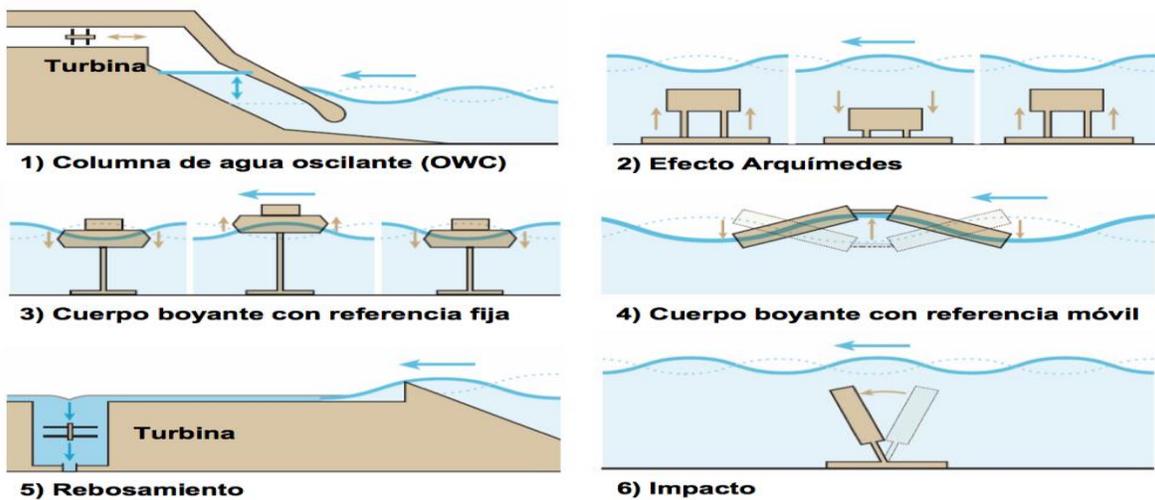


Figura 3. Distintos principios de captación de la energía de las olas.

Para elegir cual es el CEO que mejor se adecue a las características de cada sitio seleccionado para desarrollar un proyecto, es necesario realizar un estudio de las opciones disponibles actualmente, es decir, realizar un *benchmarking*. De esta forma se establecen estándares y se compara el rendimiento de los sistemas, es así como se identifica cual es la mejor tecnología existente para producir electricidad a partir del potencial energético del oleaje en un sitio específico.

El benchmark es una técnica utilizada para medir el rendimiento de un sistema producto ó empresa respecto a otra. El uso del Benchmarking (BM) está relacionado normalmente al ámbito económico y empresarial, aunque no es de uso exclusivo de este sector y puede definirse como un proceso sistemático y continuo para evaluar comparativamente los productos, servicios y procedimientos de trabajo (Spendolini, 1994). Para darnos una idea general el término “Benchmark” es un anglicismo traducible al castellano como comparativa.

Existen palabras claves que pueden ser de ayuda para comprender y desglosar el significado y finalidad del BM, las cuales son: evaluación, continuo, proceso, sistemático, comparativa y rendimiento. Actualmente el uso del BM como herramienta, se ha extendido a distintos sectores como la administración pública, la gestión urbana y gubernamental, así como dentro de la informática y sistemas de tecnología e innovación.

Un indicador clave para comparar el rendimiento de un CEO es la energía anual absorbida. Esta se puede estimar si se conocen las dimensiones, el principio de funcionamiento, el funcionamiento del mecanismo y el recurso local disponible. Sin embargo, el criterio más importante para determinar la viabilidad de cualquier dispositivo es el costo por kWh. Esto nos indica la potencia (w) que se produce por un determinado tiempo (h) (Babarit et al., 2012).

2. Antecedentes

2.1. Energías oceánicas

Desde la antigüedad navegantes y hombres de mar atestiguaron y se asombraron por las vastas capacidades energéticas de las fuerzas dinámicas de los océanos. Pensadores, científicos, inventores y aficionados intrigados por las enormes cantidades de energía almacenada a manera de reservorio en el océano, concibieron distintos proyectos para lograr captarla y aprovecharla. Semejante tarea no ha sido fácil, ha sido un camino truncado por diversas causas, tanto técnicas, económicas y hasta políticas.

De las diversas energías oceánicas aprovechables, la energía mareomotriz es la más difundida actualmente y por lo tanto la de mayor capacidad instalada. La primera planta se instaló en La Rance, Francia en 1966, donde el rango entre marea viva y muerta es de 7 m. Otras centrales se han instalado alrededor del mundo en Sihwa Lake, Corea del sur, Kislaya en la antigua URSS y Severn Barrage en Reino Unido, esta última aún en proceso de construcción (Posso, 2002).

En cuestión al uso de la energía térmica del océano, esta tiene sus orígenes en la literatura; en la notable obra del escritor francés Julio Verne publicada en 1870 "Veinte mil leguas de viaje submarino", el capitán Nemo hace mención a la posibilidad de transformar y utilizar la energía térmica almacenada en los océanos.

En 1881 Jacques Arsene D' Arsonval, un físico francés propuso un sistema basado en el ciclo termodinámico de Rankine, en el que se tomaba agua superficial de mares tropicales y de aguas cercanas a 1000 m. de profundidad de las que se puede obtener un diferencial de temperatura de 20°C, esto ayudaría a condensar y evaporar amoníaco, con lo cual haría trabajar una turbina. Sin embargo quien lo llevo a prueba fue su alumno Georges Claude en 1930 en la costa norte de Matanzas, Cuba (Calero Pérez, Carta-González, & Padrón Hernández, 2007). En el sitio se instaló una planta de 22kW que trabajo durante 11 días hasta que fue destruida por un huracán (Romanovsky, 1968).

Casos similares se presentaron en años posteriores, con plantas pilotos funcionando por pocos días o meses, debido a complicaciones técnicas o económicas. En el año 2000 se instaló un planta-barco piloto de 1 MW en India, a 35 km. de Tiruchendur, la cual estuvo operativa hasta el año 2002(Calero Pérez et al., 2007). En el año 2015 se puso en funcionamiento una planta operacional en tierra en Kaiula-Kona, Hawaii, la cual se convirtió en la primera en ser conectada a la red eléctrica.

2.2. Energía de las olas

Los primeros registros de aprovechamiento de la energía de las olas datan del siglo XIII en China, donde desarrollaron molinos accionados por el oleaje. La primera patente se registró en 1799 por los franceses Girard quienes propusieron una balsa que transfiriera la acción mecánica de las olas a poleas conectadas a maquinas, como bombas ó sierras. En el siglo XX Boucheax-Pacei suministra electricidad a su vivienda, mediante un sistema neumático similar a la columna oscilante de agua actual. A partir de 1921 el Instituto Oceanográfico de Mónaco emplea una bomba accionada por las olas para elevar agua a 60 metros.

A pesar de tener patentes desde finales del siglo XVIII, la investigación y desarrollo resurge a partir de 1970's debido a la crisis del petróleo. En la actualidad se le ha atribuido gran importancia al calentamiento global a causa de la emisión desmesurada de gases de efecto invernadero antropogénicos, por lo que la forma de obtener energía limpia es un tema de vital importancia, al que los gobiernos del mundo dedican esfuerzos (Drew et al., 2009).

De los dispositivos recientes uno de los primeros trabajos fue presentado por Yoshio Masuda el cual consiste en una boya que convierte la energía del oleaje en energía eléctrica. En la actualidad su patente sigue ampliamente utilizada para la navegación (Díaz Velilla, 2015) Otros trabajos sobresalientes incluyen el propuesto por Salter (1979), dispositivo conocido como Salter's duck. Este dispositivo fue presentado en la revista Nature y marcó un avance importante en los esfuerzos por desarrollar prototipos funcionales. El dispositivo consiste en una leva en superficie que se balancea con el paso de las crestas y valles de las

olas, esto debido a que el centro de masa es diferente del centro de rotación. Si bien el futuro lucía prometedor debido a la alta tasa de eficiencia (cerca del 80%), el proyecto fue abandonado a inicios de 1980's cuando los precios del petróleo volvieron a estabilizarse (Salter, 1974; Padilla-Hernández, 1989).

Cada dispositivo se realiza de acuerdo a las condiciones de oleaje en la región a lo que se le llama climatología de oleaje, de la cuales se establece los valores energéticos disponibles del oleaje. Respecto a trabajos realizados en la Península de Baja California Padilla-Hernández (1989) analiza una serie de tiempo de oleaje medidos con un sensor de presión frente a la Termoeléctrica de CFE en Rosarito; describe los parámetros y potencia del oleaje más energético, y de acuerdo a esto calcula el tamaño de un aparato convertidor de energía del oleaje basado en el Salter's duck. Leyva-Ollivier (2016) evaluó el recurso energético del oleaje en Rosarito, Baja California, de acuerdo a una simulación numérica de 36 años y su potencial aprovechamiento a partir de 5 dispositivos comerciales.

Perelló-Reina et al., (2017) determinó el potencial energético a lo largo de la costa occidental de la península de Baja California a partir de una modelación numérica con el modelo SWAN, esto para conocer la distribución de la energía del oleaje disponible. En esta tesis se plantea un análisis del desempeño de una selección de 8 dispositivos con las condiciones de oleaje presentes en sitios a lo largo de la costa occidental de Baja California. Esto se llevó a cabo con las matrices de eficiencia de los aparatos y con la generación de matrices de los parámetros de oleaje. Se plantea la hipótesis de trabajo en el capítulo siguiente, así como información detallada de la metodología en el capítulo 6. Los resultados discusiones y conclusiones se encuentran en los capítulos 8, 9 y 10.

3. Hipótesis

El oleaje presente en la costa occidental de Baja California es un potencial recurso energético y puede ser extraído por medio de dispositivos existentes.

La costa occidental de la península de Baja California cuenta con potencial energético suficiente para ser aprovechado por un dispositivo captador de energía del oleaje.

4. Objetivos

4.1. Objetivos Generales

Comparar distintos convertidores de Energía del oleaje bajo las condiciones de oleaje presentes en algunos puntos de la costa occidental de Baja California.

4.2. Objetivos Particulares

- Analizar condiciones de oleaje en la costa occidental de Baja California
- Estimar el potencial energético en diversos sitios de la costa occidental de Baja California
- Realizar una comparación técnica de dispositivos convertidores de energía del oleaje.
- Establecer aquellos dispositivos con mejor desempeño de acuerdo a la asociación de matrices de eficiencia de los aparatos con condiciones de la costa oeste de Baja California.

5. Área de estudio

La península de Baja California se localiza en el Noroeste de México. Está rodeada al Este por el Mar de Cortés y al Oeste por el Océano Pacífico. La península con sus 1250 km de longitud comprende los estados de Baja California y Baja California Sur. Se delimitó el área de estudio del presente trabajo al estado de Baja California, en específico a la costa occidental. La razón debido a que el recurso de importancia para el presente trabajo; el oleaje, es significativamente mayor en comparación con el Mar de Cortés donde hay otros procesos físicos que tienen mayor relevancia para su aprovechamiento como las mareas.

El estado de Baja California limita al Norte con Estados Unidos de América ($32^{\circ}43'$), al Sur con Baja California Sur (28°) al Este con el Mar de Cortés ($112^{\circ}45'$) y al Oeste con el Océano Pacífico ($117^{\circ}19'$) abarcando cerca de 746 Kms de costa. Se consideraron 10 sitios por ser zonas con potencial energético de acuerdo a (Perelló-Reina et al., 2017) y por su ubicación estratégica cerca de localidades en la costa oeste de Baja California. El área de estudio se dividió en tres áreas geográficas; Zona Norte (ZN), Zona Intermedia (ZI) y Zona Sur (ZS).

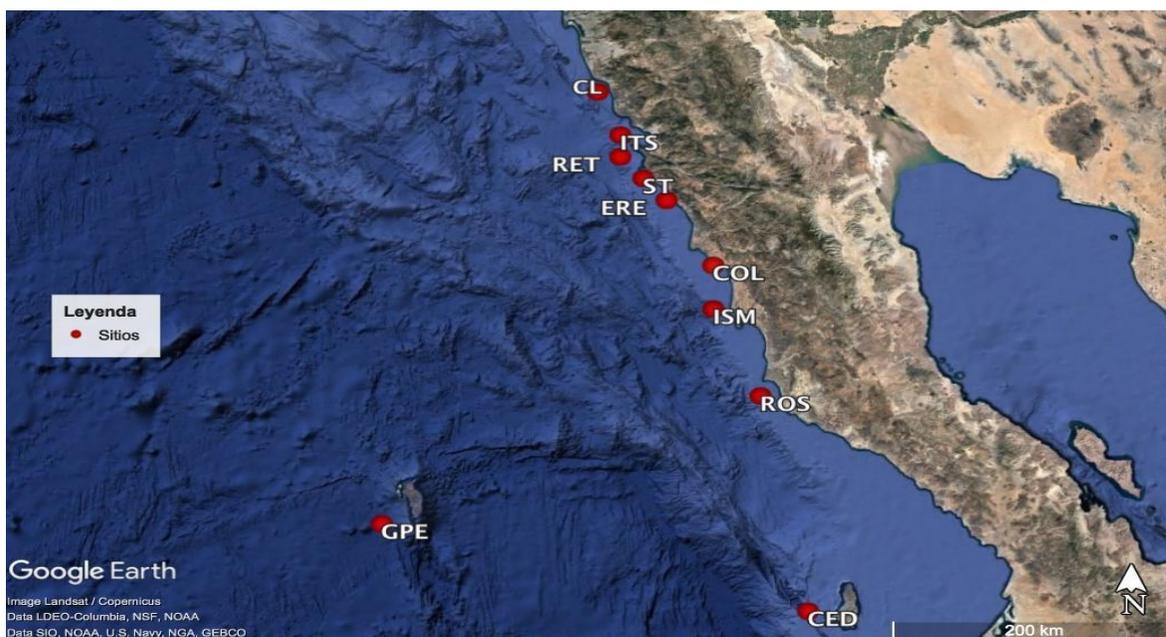


Figura 4. Ubicación de los nodos de oleaje, en el área de estudio.

6. Metodología

Se realizó una selección de 8 dispositivos comerciales y semi-comerciales, estos son: *Sea based buoy*, *Ceto buoy*, *Wavebob*, *Wavestar*, *Pontoon*, *Oyster*, *Langlee* y *Ocean Energy buoy (OE)*. Esto tratando de abarcar la mayoría del espectro de los distintos principios existentes para la conversión de energía del oleaje y de acuerdo a las matrices de eficiencia disponibles de cada aparato. Las matrices de eficiencia de los dispositivos evaluados se obtuvieron de (Babarit et al., 2012).

La evaluación del desempeño de un CEO en una locación específica está basada en la información de la climatología del oleaje y la información del funcionamiento del dispositivo CEO (Bozzi, Miquel, Antonini, Passoni, & Archetti, 2013).

La metodología más usada para estimar la potencial producción eléctrica de un dispositivo CEO en un sitio específico, está asociado a la matriz de energía de cada CEO y a la matriz del régimen de oleaje del sitio en un determinado intervalo de tiempo (Bozzi et al., 2013; Rusu & Onea, 2015; Silva, Rusu, & Soares, 2013). Para la matriz del sitio se utilizaron datos generados por diagramas de distribución bivariada (Altura-Periodo) donde se observa el porcentaje de ocurrencias dentro cada bin. El tamaño de bin utilizado fue de 1s x 0.5 m ($\Delta T_p \times \Delta H_s$). Cabe mencionar que entre mayor el intervalo de tiempo asociado a la actividad del oleaje las estimaciones resultantes deben ser más confiables (Silva et al., 2013). En la ecuación 1 se desglosa el procedimiento utilizado.

$$P_{ext} = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{n_T} \cdot \sum_{j=1}^{n_H} \cdot W_{i,j} \cdot P_{i,j} \quad (1)$$

Donde $W_{i,j}$ representa la matriz de oleaje con el porcentaje de energía correspondiente al bin definido por la columna j y la línea i , mientras que $P_{i,j}$ representa la matriz de eficiencia del dispositivo.

Con lo anterior se obtuvieron estimaciones mensuales, y anual del potencial energético extraíble de cada dispositivo en los distintos sitios.

Así mismo se analizaron características, limitaciones, parámetros de desempeño, indicadores de costos y potenciales beneficios de los dispositivos seleccionados.

Los parámetros de desempeño que se consideraron son los presentados por (Price, Dent, & Wallace, 2009; Rusu & Onea, 2015, 2016) como el Factor de capacidad (F_c), la Amplitud ó ancho de captura (A_c) y la razón del ancho de captura (η_1).

$$A_c = \frac{Pe}{P_w} \quad \eta_1 = \frac{Pe}{P_w \cdot B} = \frac{A_c}{B} \quad F_c = 100 \cdot \frac{Pe}{Nom}$$

(2)

(3)

(4)

El ancho de captura (A_c), se define como la relación entre la potencia promedio esperada del dispositivo Pe (kW) y el flujo de energía del sitio P_w (kW/m) (Ecuación 2). Esto equivale a la longitud de frente de ola que es absorbido totalmente por el CEO, las unidades están dadas en metros.

La razón del ancho de captura (η_1) (Ecuación 3) presenta la relación que existe entre el Ancho de captura y la dimensión característica más relevante del aparato, normalmente se usa la anchura de este (B). Los resultados muestran en porcentaje la fracción de energía del oleaje que es absorbida por el aparato (Babarit, 2015).

Mientras que el factor de capacidad es la relación de la potencia promedio esperada del dispositivo Pe (kW) y la potencia nominal del dispositivo Nom (kW). La potencia nominal es la potencia máxima a la cual está diseñado el aparato para trabajar. La relación se muestra en la ecuación 4, los resultados están dados en porcentajes.

Para el caso de los parámetros indicadores de costos, se evaluó la relación entre la energía anual extraíble y la masa característica de cada dispositivo (kWh/kg). De igual manera se calculó la proporción entre la energía anual extraíble y el área superficial sumergida de cada aparato (MWh/). Así mismo el potencial

energético anual extraíble (kW) se consideró como un parámetro indicador de costos. En la figura 5 se explica mediante un diagrama la metodología utilizada.

6.1. Oleaje

El potencial energético (P_E) de una ola puede estimarse con la ecuación de flujo de energía en aguas profundas:

$$P_E = \frac{\rho g^2 T_P H_{mo}^2}{64\pi} \quad (5)$$

donde ρ representa la densidad del agua de mar, g la gravedad terrestre, T_P es el período pico del oleaje, H_{mo} es la altura media del oleaje. El resultado está dado en kilowatts por metro lineal de frente de ola.

Esta ecuación parte de la relación que existe entre la altura y el período de la ola, que es directamente proporcional a la cantidad de energía que ésta transporta.

Con los datos de altura y periodo de las series de tiempo de cada sitio se resolvió la ecuación de potencial energético y se calcularon promedios mensuales y anuales de energía del oleaje disponible. Del mismo modo se estudió la variabilidad del recurso en el área de estudio, vista a detalle en el capítulo 6.3.

Así mismo se emitieron diagramas de dispersión de distribución conjunta (H_s - T_p) de las series de tiempo de cada uno de los sitios. En estos diagramas el tamaño de bin fue de 1s x 0.2 m (ΔT_p x ΔH_s) y a modo de referencia se le agregaron isolíneas de potencial energético.

6.2. Sitios

Los datos de oleaje se obtuvieron mediante el Modelo de distribución de tercera generación WaveWatch III (Tolman, 2002). El modelo generó 24 años de datos de 1992-2016, fue forzado con viento CFSR con una resolución espacial de 1/4 grados y un intervalo de 1 hora.

Clave	Estación	Longitud W	Latitud N
CL	Campo López	-116.9999	32.1668
ITS	Isla Todos Santos	-116.8332	31.8334
RET	Retiro	-116.8332	31.6668
ST	Santo Tomas	-116.6666	31.5001
ERE	Eréndira	-116.4999	31.3334
COL	Colonet	-116.1665	30.8334
ISM	Isla San Martín	-116.1666	30.5001
ER	El Rosario	-115.8332	29.8334
GPE	Isla Guadalupe	-118.475532	28.875278
CED	Isla de Cedros	-115.564458	28.090894

Tabla I. Coordenadas de los sitios propuestos.

Los datos de oleaje de cada nodo fueron analizados y procesados con el software Matlab_2016b. La serie de tiempo comprende 24 años, con datos cada 3 horas, con salidas de los parámetros más relevantes: altura significativa Hs, periodo pico Tp, y dirección media Dm, como se muestra en la tabla II.

Año	Día	Mes	Hora	Hs	Tp	Dm
1994	1	1	0	1.252	13.889	279
1994	1	1	3	1.244	13.699	281
1994	1	1	6	1.216	13.514	282

Tabla II. Representación de base de datos de oleaje.

6.3. Análisis estadístico

6.3.1. Variabilidad

Conocer la variabilidad del oleaje, en las distintas escalas de tiempo es un factor importante para la viabilidad de cualquier proyecto de extracción de energía undimotriz (Cornett, 2008). En el presente trabajo se estimaron índices del Coeficiente de Variación (COV) de la energía del oleaje disponible para cada serie de tiempo de cada uno de los sitios.

El COV determina la variabilidad en todas las escalas de tiempo desde cada hora a estacional. Para una serie de tiempo ficticia en la que el recurso energético no varía el valor sería $COV(P)=0$, mientras que en el caso que la desviación estándar sea del doble que el promedio sería $COV(P)=2$. En la siguiente ecuación se desglosa el COV de acuerdo a (Cornett, 2008; Vannucchi & Cappietti, 2016).

$$COV(P) = \frac{\sigma(P(t))}{\mu(P(t))} = \frac{[(P - \underline{P})^2]^{0.5}}{\underline{P}} \quad (6)$$

Donde σ es la desviación estándar y μ es el promedio de los valores de potencia de la serie de tiempo.

Para contar con un indicador específico de variabilidad estacional se usó el índice de variabilidad estacional (SV) que se muestra en la ecuación 4.

$$SV = \frac{P_{S1} - P_{S4}}{\underline{P}} \quad (7)$$

Donde P_{S1} es el promedio de energía del oleaje para la estación más energética en este particular caso fue durante invierno. Mientras que P_{S4} es el promedio de energía del oleaje durante la temporada estacional menos energética (Verano).

Así mismo se estimó el índice variabilidad mensual (MV), como se muestra en la ecuación 5.

$$MV = \frac{P_{M1} - P_{M12}}{\underline{P}} \quad (8)$$

Donde P_{M1} es el valor promedio para el mes más energético, mientras que P_{M12} es el promedio para el mes menos energético. El índice MV describe la fluctuación máxima del promedio mensual de energía disponible relativa al promedio total.

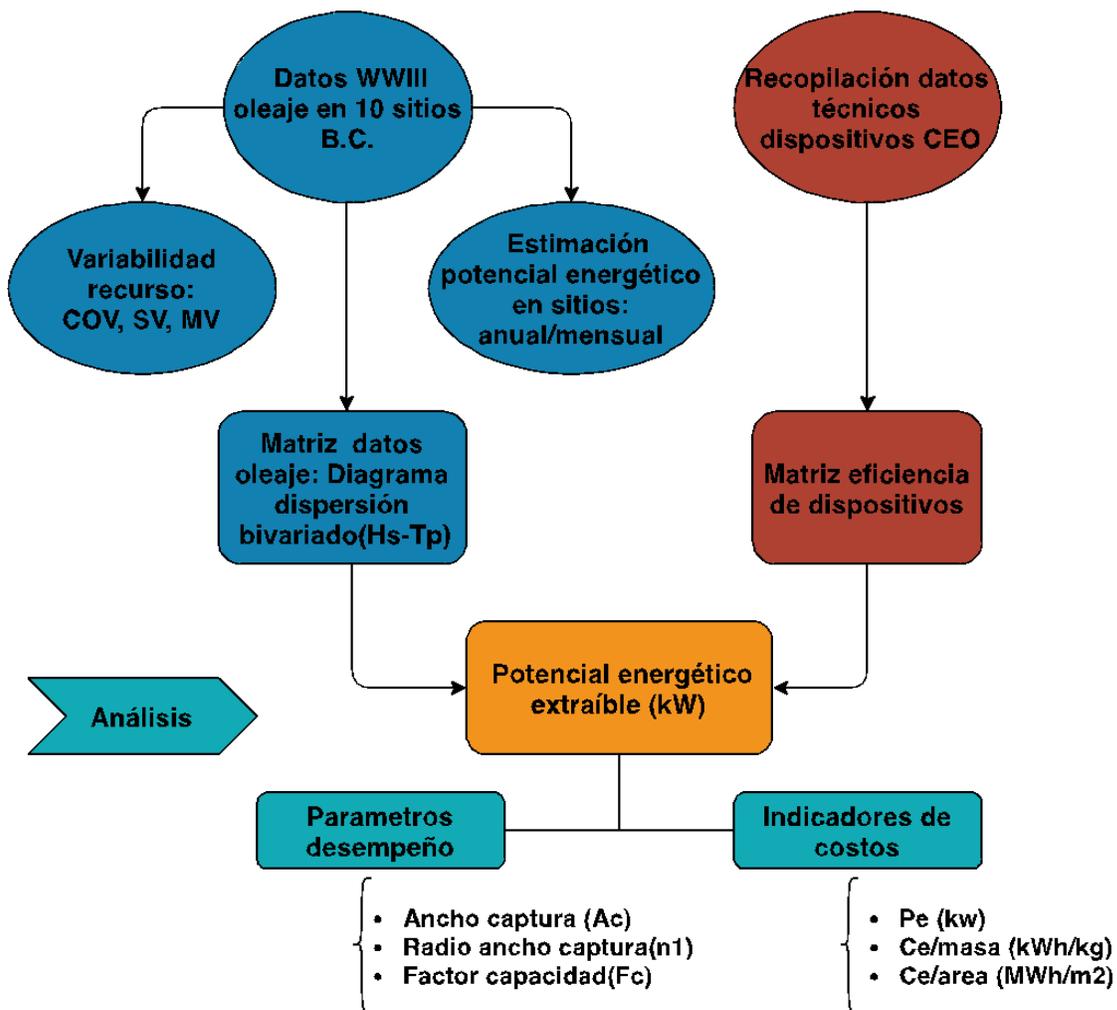


Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología utilizada en el presente trabajo.

7. Dispositivos Analizados

7.1. *Sea-based buoy*

El dispositivo *Sea-based buoy* es un convertidor de energía del oleaje desarrollado por *Seabased AB*, una compañía dedicada a la innovación y patentes. Fundada en 2001 y con base en Suecia, la compañía ha estado asociada con la investigación realizada en el Centro Sueco de Conversión Eléctrica de Energías Renovables, en la Universidad de Uppsala. La investigación ha estado a cargo del Profesor Mats Leijon, así como del Profesor Hans Bernhoff, quienes son los fundadores de la compañía (Jonsson & Krell, 2011).

El dispositivo consiste de una boya axí-simétrica flotante en superficie que está conectada a un sistema que permanece fijo al fondo marino. El sistema está conformado por un generador lineal dentro de un compartimiento de acero que a su vez va montado en una estructura de concreto. El movimiento vertical de las olas genera un constante tirón en el cable que acciona el generador (Babarit et al., 2012; Salar, 2018).

El sistema mecánico es muy simple (lineal), no contiene muchas piezas móviles lo cual es útil para la resistencia y mantenimiento. El acoplamiento directo entre la boya y el generador permite que el movimiento sea simulado con la misma velocidad y dirección por el generador, lo que es una gran ventaja para el sistema mecánico. Los generadores eléctricos convencionales trabajan a altas velocidades rotativas, presentan alto desgaste en el violento ambiente oceánico y su operación se complica al requerir una distribución de oleaje constante para la transformación óptima del movimiento de las olas a energía (Waters, 2008). Varios autores concuerdan con las ventajas del uso de generadores lineales en dispositivos CEO (Arija, 2011; Kimoulakis, Kladas, & Tegopoulos, 2008; Waters, 2008). Sin embargo, para conectar sistemas con generadores lineales a la red se requiere de una conversión a la frecuencia de la red, esto se puede llevar a cabo de dos maneras, transmitiendo el voltaje de salida por cables hasta la costa donde en una estación se convierta a la frecuencia de la red, con la desventaja que en la transmisión a costa existen pérdidas. La segunda y la utilizada por el sistema

Sea-Based como se muestra en la figura 6 es la conversión cerca de los CEO en una subestación para evitar las pérdidas de energía.

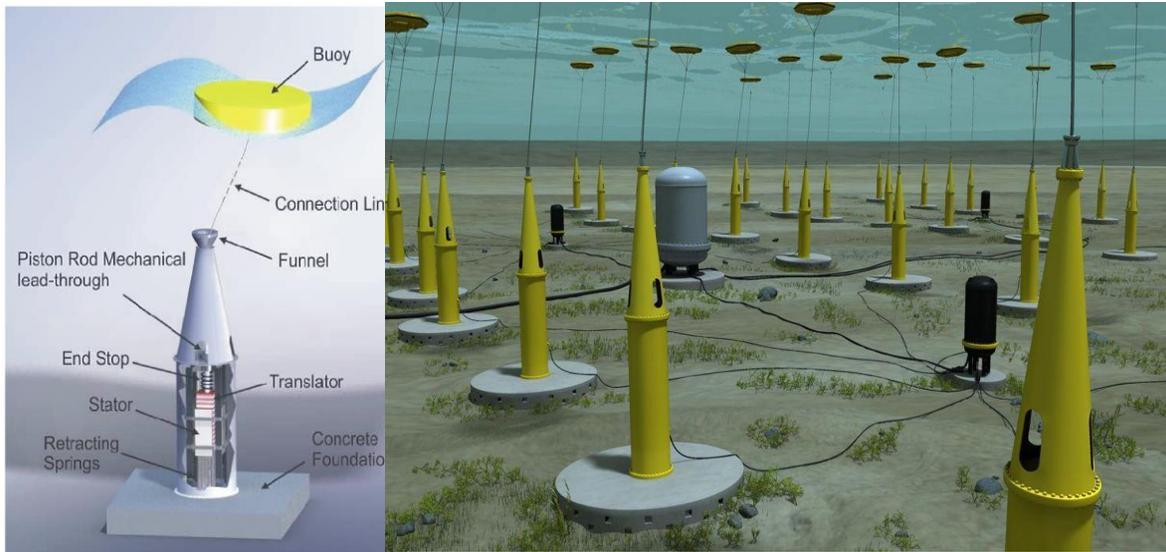


Figura 6. Imagen y esquema del funcionamiento del dispositivo *Sea-based* (Babarit et al., 2012; *SeaBased AB*, 2019)

7.2. *Ceto buoy*

Carnegie Wave Energy es el desarrollador del sistema *CETO*, este convertidor de energía del oleaje es un dispositivo desarrollado en Australia. La compañía está dedicada al desarrollo y comercialización de sistemas con energías limpias. Su subsidiaria Energy Made Clean ofrece proyectos en energía solar, almacenamiento, undimotriz, e híbridos. El desarrollo del sistema *CETO* inicio en 1999 con trabajos de investigación y diseño. Para 2003 comenzaron las labores de construcción del primer prototipo y en 2006 el sistema ya había sido probado exitosamente. A lo largo de los años se fueron haciendo mejoras en los dispositivos, por lo que fueron emergiendo nuevas versiones del *CETO*. Entre 2006 y 2008 se probaron prototipos del *CETO 2* de 1 kW, en el sitio piloto de investigación en las costas de Fremantle, Australia Occidental. En los años posteriores los dispositivos aumentaron su capacidad a 80kW y después a 240kW, en este punto unidades del *CETO 5* de 240kW a escala completa fueron desplegadas en la base naval de Garden Island, en Perth que acumularon más de 14,000 horas de servicio a lo largo de 4 temporadas (Carnegie Clean Energy, 2019). Esta versión del dispositivo es la que se utilizará en los resultados de este trabajo.

El principio de funcionamiento del *CETO buoy* se muestra en la figura 7. Se trata de una boya completamente sumergida, que con el vaivén de las olas en superficie oscila. La tensión resultante en el cable acciona un pistón hidráulico (power take-off ó sistema de arranque) anclado al fondo marino, mientras que este a su vez bombea agua a alta presión hacia una planta en la costa (Rafiee & Fiévez, 2015). Por lo tanto, la conversión de energía hidráulica a energía eléctrica se realiza en tierra, esto se logra con turbinas Pelton conectadas a generadores eléctricos lineales. Lo interesante del sistema *CETO* radica en este apartado; el agua presurizada directamente puede ser utilizada para accionar una turbina para generación eléctrica, ó se puede utilizar como sistema de bombeo para ser aprovechada para la desalinización de agua de mar, incluso un sistema mixto (Mann, 2011).

De acuerdo a su sitio web (Carnegie Clean Energy, 2019), en la actualidad Carnegie Clean Energy es la única compañía en el mundo que ofrece sistemas híbridos en energías limpias y que ha logrado probar el funcionamiento conectado a la red y a escala completa de un sistema CEO.



Figura 7. Imagen y esquema del funcionamiento del dispositivo *Ceto* (Carnegie Clean Energy, 2019).

7.3. Wavebob

El dispositivo *Wavebob* es desarrollado por la compañía Irlandesa del mismo nombre. En 2007 después de años de investigación y desarrollo y de varios modelos a escala, se logró la instalación de un dispositivo a escala 1:4 en la bahía de Galway, Irlanda (Mouwen, 2008; Weber, Mouwen, Parish, & Robertson, 2014). En los años posteriores la compañía se dedicó a mejorar aspectos clave para lograr despegar el sistema *Wavebob* a una etapa semi-comercial con dispositivos a escala completa. Para lograr dicha hazaña se desarrollaron procesos en ingeniería de sistemas para respaldar los requerimientos en operación, mantenimiento y diseño del sistema a escala completa y para ser comercializado (Weber et al., 2014).

Pese a que la compañía cesó actividades oficialmente en 2013 debido a falta de financiamiento (Downing, 2013), cabe mencionar la importancia de analizar el comportamiento del aparato para futuros estudios con dispositivos con principios de funcionamiento similares.

Wavebob es un CEO que posee simetría axial, del tipo absorbedor puntual. El sistema está compuesto de dos cuerpos concéntricos, en la parte superior un toro ó toroide (dona) donde se desliza en la parte interna un cuerpo boyante. El sistema PTO se acciona por el movimiento relativo entre los dos cuerpos (Muliawan, Gao, & Moan, 2013).

Los CEO de dos cuerpos están diseñados para que con el movimiento hacia arriba y hacia abajo de las olas, la toma de fuerza (PTO) extraiga o capte energía de las olas. Para optimizar la absorción de esta energía, el ajuste del sistema de toma de fuerza que es en un acoplamiento mecánico debe estar en función de las condiciones de los estados de mar. No obstante, durante eventos extremos la supervivencia del sistema es de mayor relevancia que la captación en sí, por lo que se emplean estrategias de supervivencia como un sistema de bloqueo en la interfaz entre los dos cuerpos con lo cual se evitan daños en el sistema PTO por estos repentinos suministros de fuerza (Muliawan et al., 2013).

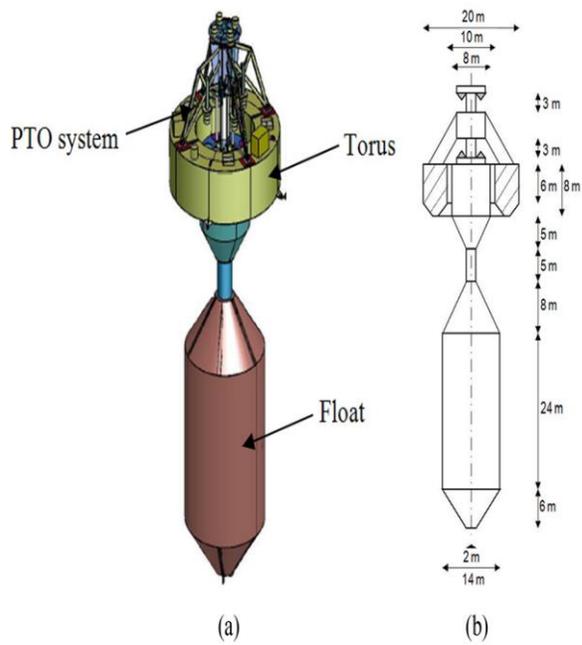


Figura 8. Imagen y esquema del dispositivo *Wavebob*. Se observan las dimensiones y partes del sistema, así como un dispositivo a escala 1:4 en funcionamiento en la Bahía de Galway, Irlanda (Mouwen, 2008; Weber et al., 2014).

7.4. *Wavestar*

El sistema *Wavestar* se inició a desarrollar en Dinamarca a partir del 2000. Para el año 2004 se creó un modelo a escala 1:40 del concepto y se probó en el estanque de oleaje de la Universidad de Aalborg, con esto se verificó el funcionamiento del concepto y se documentaron los datos de energía obtenida. En 2005 se comenzó con la construcción de un modelo escala 1:10 con la intención de probarlo en el océano. El sitio elegido fue Nissum Bredning una laguna litoral en Dinamarca donde el oleaje es aproximadamente una 1:10 de tamaño en comparación al Mar del norte. Al año siguiente se instaló exitosamente el dispositivo acumulando hasta 15,000 horas operacionales y soportado más de 15 tormentas sin daños en el sistema (Wave Star A/S, 2019).

Con la intención de demostrar, convencer y dar a conocer el proyecto a inversionistas prensa y público en general, en 2010 se instaló un dispositivo a escala 1:2 en Hanstholm en la costa occidental de Dinamarca. Este dispositivo capacidad de 110kW fue instalado a 6 metros de profundidad cerca del pier Roshage y cuenta con dos captadores ó flotantes de 5 metros de diámetro. El sistema final con una potencia nominal de 600kW contaría con 20 captadores (Figura 9), en un arreglo de 10 a cada costado y se preveé instalarlo a profundidades de entre 10 a 20 metros, aunque también se considera la opción de formar sistemas híbridos con parques eólicos en aguas profundas (Kramer, 2011).

El sistema está compuesto por flotantes con brazos que van conectados a una estructura puente que se fija con pilares al fondo marino. El movimiento relativo entre los flotantes hemisféricos y la estructura fija es convertido en energía útil por medio de (rams) hidráulicos que bombean fluido a un colector múltiple que produce un flujo constante de fluido a alta presión a un motor hidráulico y acciona un generador eléctrico (Kramer, 2011; Wave Star A/S, 2013).

En caso de eventos extremos que pongan en peligro la supervivencia del sistema el puente se eleva a una altura segura al igual que los brazos como se muestra en la figura 9.

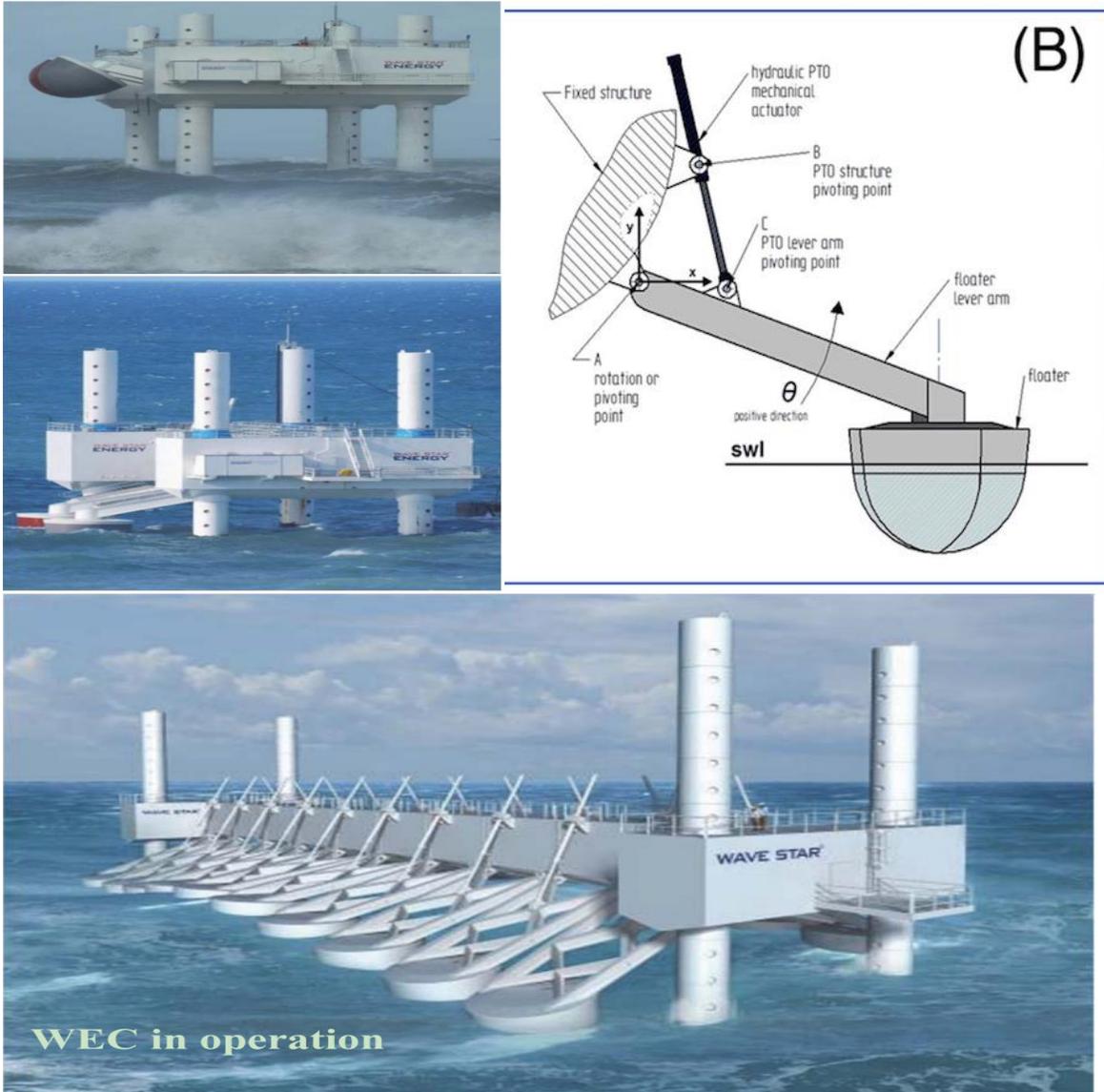


Figura 9. Selección de esquemas e imágenes del dispositivo *WaveStar*. En la imagen superior izquierda se observa el dispositivo en fase de supervivencia, en las imágenes inferiores en operación (Wave Star A/S, 2019).

7.5. Pontoon Power Converter

El sistema *Pontoon Power Converter* (PPC) se encuentra en fase de investigación y desarrollo en Noruega desde 2010 por la empresa *Pontoon Power AS*. El equipo de trabajo ha logrado llevar experimentos en un canal de pruebas con apoyo de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (NTNU) y Statkraft empresa noruega líder en energía hidroeléctrica. La primera prueba en canal fue con un solo flotador ó pontón a escala 1:10, con el que se recabó información sobre el desempeño del dispositivo. La segunda prueba se realizó con 32 flotadores en una escala 1:50 del tamaño final del dispositivo, esto ayudo a comprender como se comportarían los arreglos de múltiples flotadores en el océano, así como probar el sistema de seguridad anti-tormentas donde se propone sumergir los flotadores para evitar daños en el sistema por eventos extremos que excedan la carga del sistema. Para la tercera prueba se propone un modelo a escala 1:10 de 12 flotadores, para luego realizar pruebas en el océano con un modelo a escala completa con un número limitado de flotadores (Pontoon Power, 2012).

El PPC consta de un sistema multi-flotante compuesto por varias boyas ó pontones conectados a una estructura de referencia. Esta estructura está compuesta de un solo soporte y una serie de lastres conectados por cables de tensión. La fuerza total boyante de los pontones se equilibra con las fuerzas de gravedad neta de los lastres (Figura 10). La toma de fuerza (PTO) del sistema con la que se capta el movimiento de las olas es hidráulica (Pontoon Power, 2012).

De acuerdo al análisis de (Babarit et al., 2012) para la generación de las matrices de eficiencia de los dispositivos se propuso un arreglo de 10 flotadores.

El PPC está diseñado para trabajar en aguas profundas, junto a generadores eólicos fuera de la costa, con el potencial de crear sistemas híbridos. En la actualidad la empresa se encuentra en la búsqueda de apoyos gubernamentales y privados para llevar a cabo las pruebas faltantes, así como para la construcción de los dispositivos.

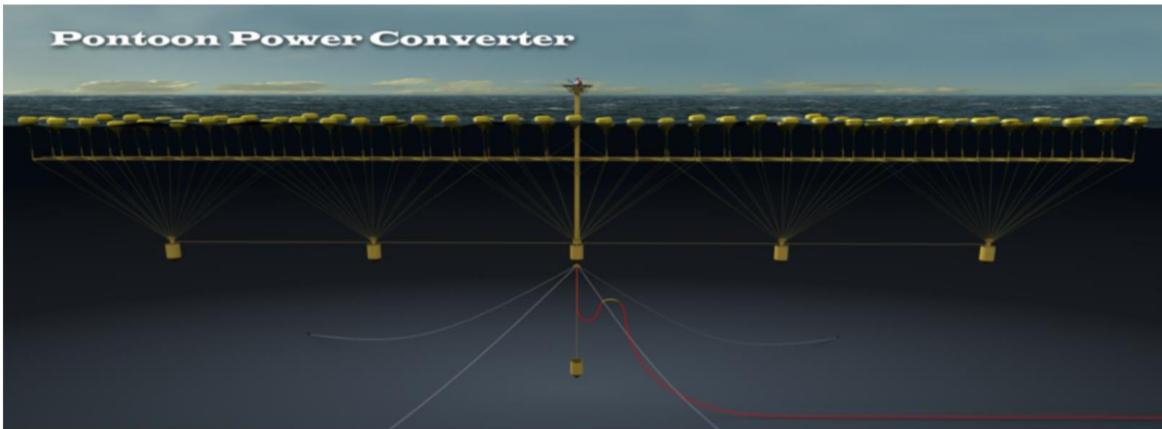
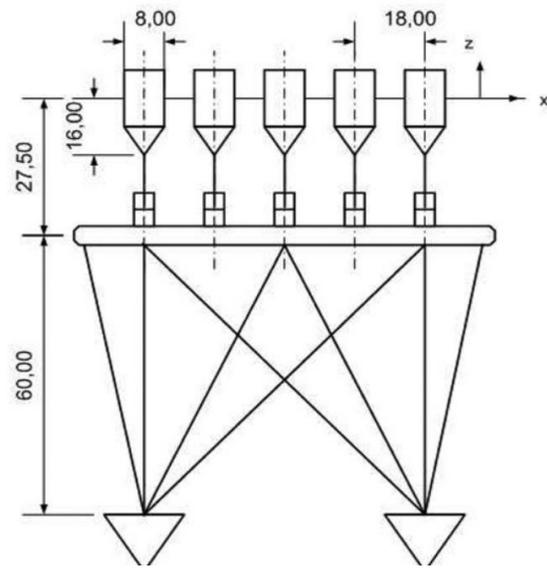
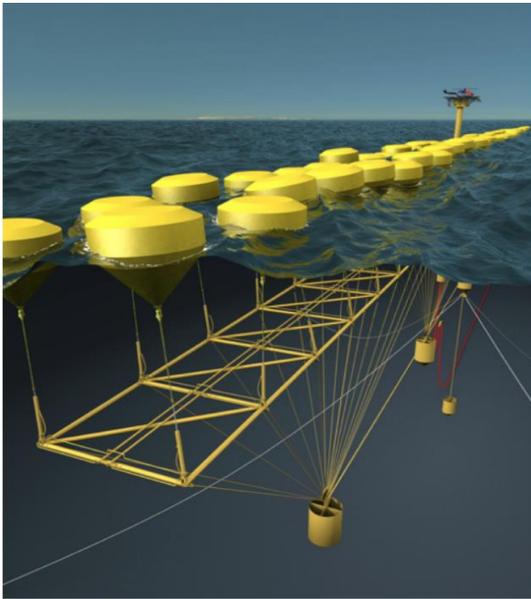


Figura 10. Selección de imágenes del concepto del dispositivo *Pontoon Power Converter* (Pontoon Power, 2012).

7.6. *Oyster*

El dispositivo *Oyster* es desarrollado en Escocia a partir de 2005 por la compañía Aquamarine Power Ltd. En los albores de la investigación y desarrollo, el primer dispositivo a escala completa fue probado en Orkney, Escocia. Este primer *Oyster* fue instalado con ayuda del Centro Europeo de Energía Marina (EMEC) en 2009. Con los datos y la experiencia obtenida se propusieron mejoras en el diseño y escala del aparato, lo que llevo al *Oyster2*, en este la longitud horizontal de la paleta aumentó a 26 metros y los módulos hidráulicos se movieron a los lados de la paleta para una mayor accesibilidad. Los módulos hidráulicos y la paleta se volvieron unidades reemplazables todo en uno, con similar vida operacional con el objetivo de reducir costos por mantenimiento. (Henry, Doherty, & Whittaker, 2010)

El sistema consiste de una paleta unida al fondo marino que atraviesa la columna de agua hasta la superficie, por lo tanto este dispositivo es para sitios cerca de la costa donde la profundidad sea entre 10 y 15 metros. La oscilación de la paleta con el empuje de las olas acciona dos pistones hidráulicos que presurizan agua dulce por una línea de alta presión hacia una planta hidroeléctrica en la costa. Mediante una turbina Pelton la planta hidroeléctrica convierte la presión hidráulica en energía eléctrica con un generador eléctrico, finalmente el sistema se cierra con una línea que regresa agua dulce a baja presión al dispositivo (Cameron et al., 2010).

La peculiaridad del dispositivo *Oyster* es que está diseñado para trabajar cerca de la costa con las ventajas y desventajas que esto puede ocasionar. De acuerdo a (Cameron et al., 2010) al tener un dispositivo funcionando cerca de la costa los riesgos por daño debido a eventos extremos como tormentas disminuye y se concentra el espectro direccional del oleaje. El recurso es filtrado con extremos limitados, consistente y concentrado. Además, debido a su proximidad a la costa los costos de transporte y mantenimiento son considerablemente menores.

La desventaja principal es que la energía del oleaje disponible es considerablemente menor cerca de la costa, aun así (Henry et al., 2010) y

(Emiliano Renzi, Gallagher, Wei, & Abadie, 2017) aseguran que es preferible contar con una alta cantidad de energía extraíble, que con energía disponible, y qué está energía extraíble es tenuemente menor a la que se encuentra fuera de la costa.

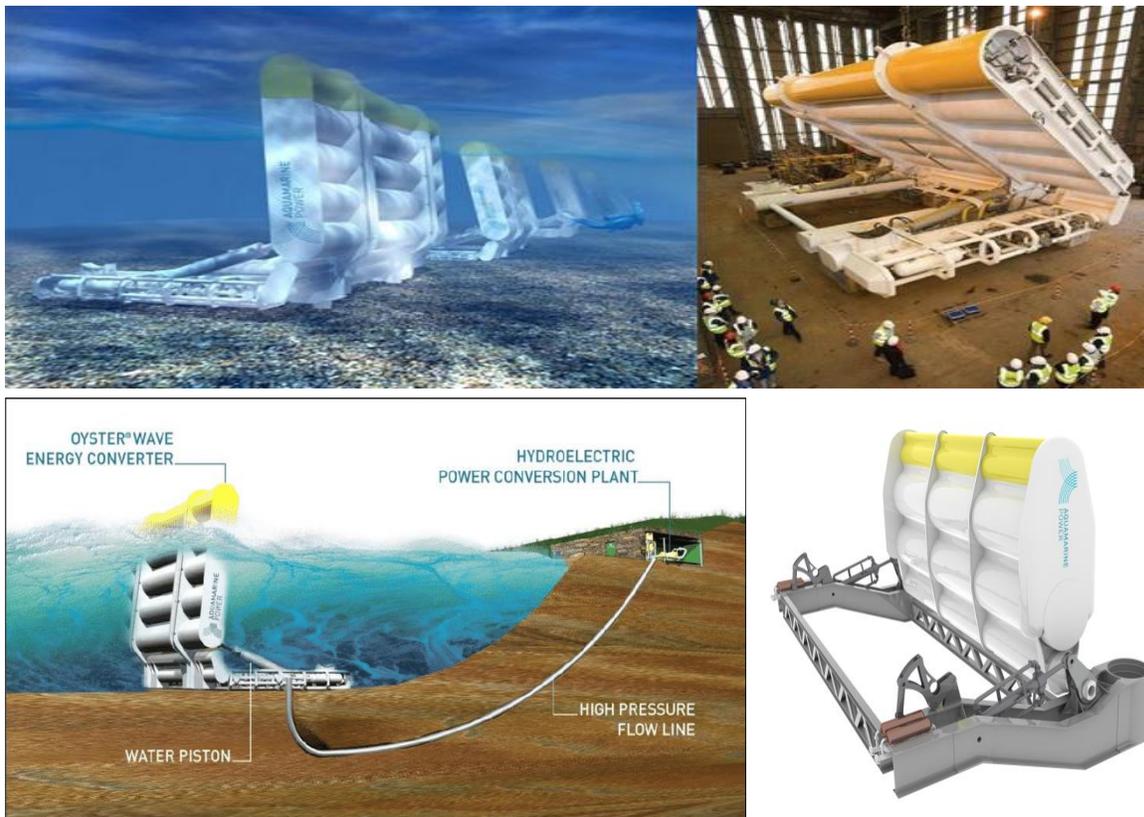


Figura 11. Selección de imágenes del dispositivo *Oyster*. Las imágenes superiores e inferior izquierda corresponden a las características del *Oyster* utilizado en este estudio, la imagen inferior derecha corresponde al *Oyster2* (Babarit et al., 2012; E. Renzi, Doherty, Henry, & Dias, 2014).

7.7. Langlee

Langlee Wave Power AS, es la compañía que desarrolla el dispositivo *Langlee*, con base en Noruega. El concepto nació en 2006 con la idea de un par de paletas unidas a un cuadro situado en superficie semi-sumergido, durante ese mismo año se iniciaron pruebas en un canal de olas para verificar su funcionamiento.

En 2012 *Langlee Wave Power AS* estableció una subsidiaria, en las islas Canarias, España. Esto con el motivo de aprovechar el potencial de las islas y cooperar de cerca con organismos públicos y privados. Se han realizado pruebas de modelos a escala en las instalaciones de la Plataforma Oceánica de Canarias (PLOCAN), un laboratorio con infraestructura en mar dedicado al desarrollo de la ciencia y tecnologías marinas (*Langlee Wave Power AS*, 2013). Durante este año además se renovó el diseño a uno más aerodinámico, fabricado con acero utilizado en la industria naval y es el que se encuentra actualmente en fase de semi-comercialización (Figura 12).

El sistema consiste de dos pares de paletas conectadas al mismo cuadro. El movimiento de las paletas debido a la acción del oleaje respecto al cuadro es convertido en energía útil. El dispositivo *Langlee* es un convertidor de onda oscilante ya que capta y extrae la energía cinética disponible en el movimiento orbital de las partículas de agua, excitadas por acción de las olas, mediante paletas ó bisagras opuestas una a la otra, colocadas apenas por debajo de la superficie (A Pecher, Kofoed, Espedal, & Hagberg, 2010).

La toma de fuerza, así como el sistema de conversión a energía eléctrica (generador lineal) se encuentran en el cuadro de referencia, por lo que se transmite el flujo eléctrico a través de cables submarinos hacia la costa.

De acuerdo a (A Pecher et al., 2010) el desempeño del aparato depende mucho del periodo de oleaje más que de la altura de ola, el rendimiento máximo se presenta cuando la longitud de onda es del doble de la longitud del dispositivo y por consiguiente de la distancia entre bisagras; por lo tanto, estas se mueven simultáneamente en direcciones opuestas (Figura 12). Para mayores periodos de ola el desempeño del dispositivo tiende a disminuir significativamente más que

para periodos más cortos. Otro factor importante es la dirección del oleaje incidente, el dispositivo tiende a reducir eficiencia si el oleaje es oblicuo a más de 45° (Figura 12) (A Pecher et al., 2010).

Por lo anterior la compañía propone que el dispositivo se pueda ajustar a las condiciones de oleaje del sitio de trabajo en relación a la longitud de onda y dirección del oleaje incidente. Un ejemplo puede verse en la configuración de dispositivos para las islas Canarias. El "*Langlee Robusto*" tiene una dimensión del cuadro de 30x50 metros, una potencia nominal de 132 kW y un rango de absorción de 60° por lo que el sitio es ideal porque recibe hasta un 90% de oleaje incidente del N-NE (Langlee Wave Power AS, 2013).

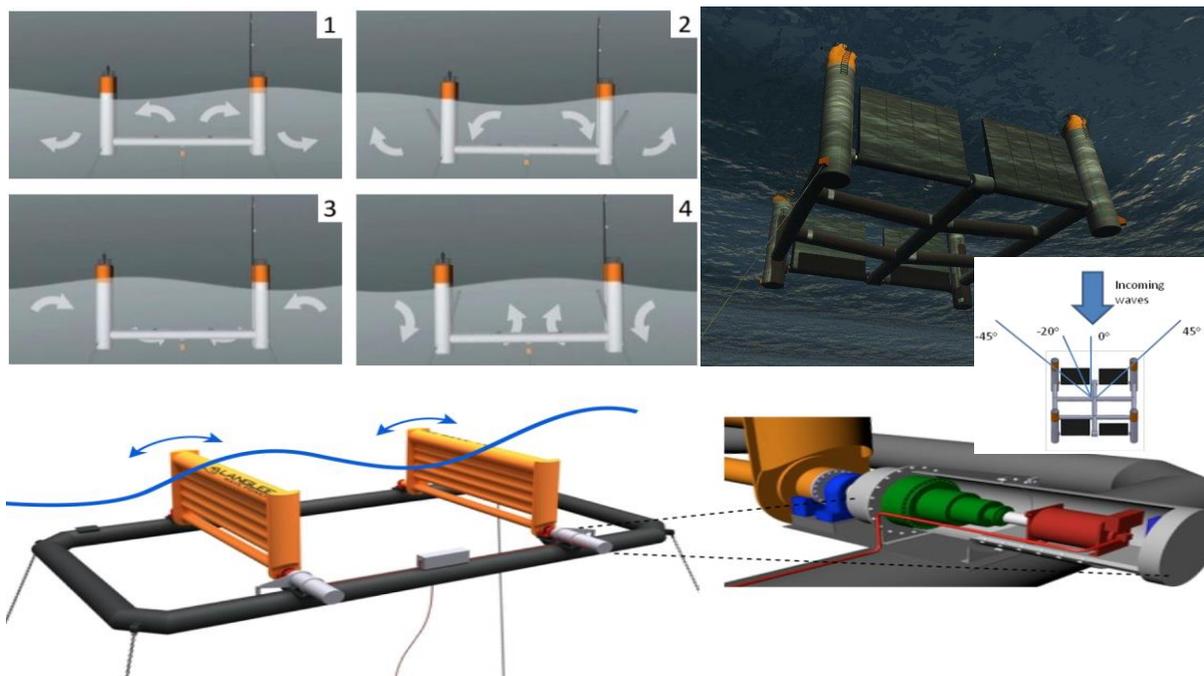


Figura 12. Selección de imágenes y esquemas del dispositivo *Langlee*. Las imágenes superiores representan al dispositivo *Langlee* con las dimensiones y características utilizadas en este trabajo, mientras que en los esquemas inferiores el *Langlee Robusto* (Langlee Wave Power AS, 2013).

7.8. *OE buoy*

El sistema *OE buoy* es un dispositivo del tipo Columna de agua oscilante (OWC) del tipo flotante y es desarrollado por Ocean Energy Ltd. en Irlanda. Durante los primeros estadios del dispositivo se probó un modelo escala 1:50 en la Universidad de Cork, con lo que auxilio a conocer la configuración de la cámara para una mayor eficiencia. Más adelante se llevaron a cabo pruebas con un modelo escala 1:15 en la Ecole Centrale de Nantes, con resultados exitosos por lo que consiguiente se llevaron a cabo pruebas en el océano (Ocean Energy Ireland, 2017). En 2011 un modelo a escala 1:4 de 28 toneladas se instaló en la Bahía de Galway, Irlanda, con lo que se obtuvieron datos de la producción de energía. Esta información junto con datos in-situ de una boya Wave-rider operada por el Instituto Marino de Irlanda fueron usados tener mediciones de parámetros estadísticos del oleaje y compararlos con los datos energía del dispositivo y así calcular la eficiencia en función del estado del mar del sitio. Con esto se pueden estimar valores anuales de potencia para ese o cualquier otro sitio, así como estimar valores para un dispositivo a escala completa (Lavelle & Kofoed, 2011).

El principio de funcionamiento del *OE buoy* es el de una columna oscilante flotante, específicamente del tipo boya con ducto curvado hacia atrás (*backward bent duct buoy* (BBDB)) propuesta por primera vez por Masuda et al, (1986). El BBDB es un OWC en forma de L, con un módulo boyante, una cámara y una turbina de aire como se muestra en la figura 13. Masuda et al. (1986) estudiaron primero este tipo de dispositivos con el ducto sumergido de frente al oleaje incidente, pero sorprendentemente se dieron cuenta que el desempeño del aparato mejoraba posicionándolo en sentido contrario a las olas (Falcao & Henriques, 2016).

El movimiento de las olas en la columna de agua dentro de la cámara del dispositivo presuriza y despresurizan el aire atrapado dentro de la cámara y este fluye a través de una turbina de aire (Babarit et al., 2012).

Las columnas de agua oscilante (OWC) pueden estar fijas o flotantes y son de las tecnologías más desarrolladas y documentadas para extraer energía de las olas (Lavelle & Kofoed, 2011). Las OWC tienen como principal ventaja no poseer

mecanismos móviles en el agua para el sistema PTO. Desde el punto de vista mecánico el sistema es simple y confiable; el rotor de la turbina de aire es la única parte móvil y se localiza fuera del alcance del agua, lo cual es una ventaja (Falcao & Henriques, 2016). En consiguiente algunas OWC fijas han tenido relativo éxito (plantas piloto) y las OWC flotantes han llegado a etapas de pruebas en el océano, por lo que su desarrollo ha llamado la atención (Sheng, Lewis, & Alcorn, 2011). Típicamente se ha utilizado la turbina Wells para el PTO de las OWC. Esto debido a que la turbina Wells es una turbina auto-rectificante esto quiere decir que puede operar con ambas direcciones del flujo de aire, ya que este cambia con el ciclo de las olas (figura 13) (Lavelle & Kofoed, 2011).

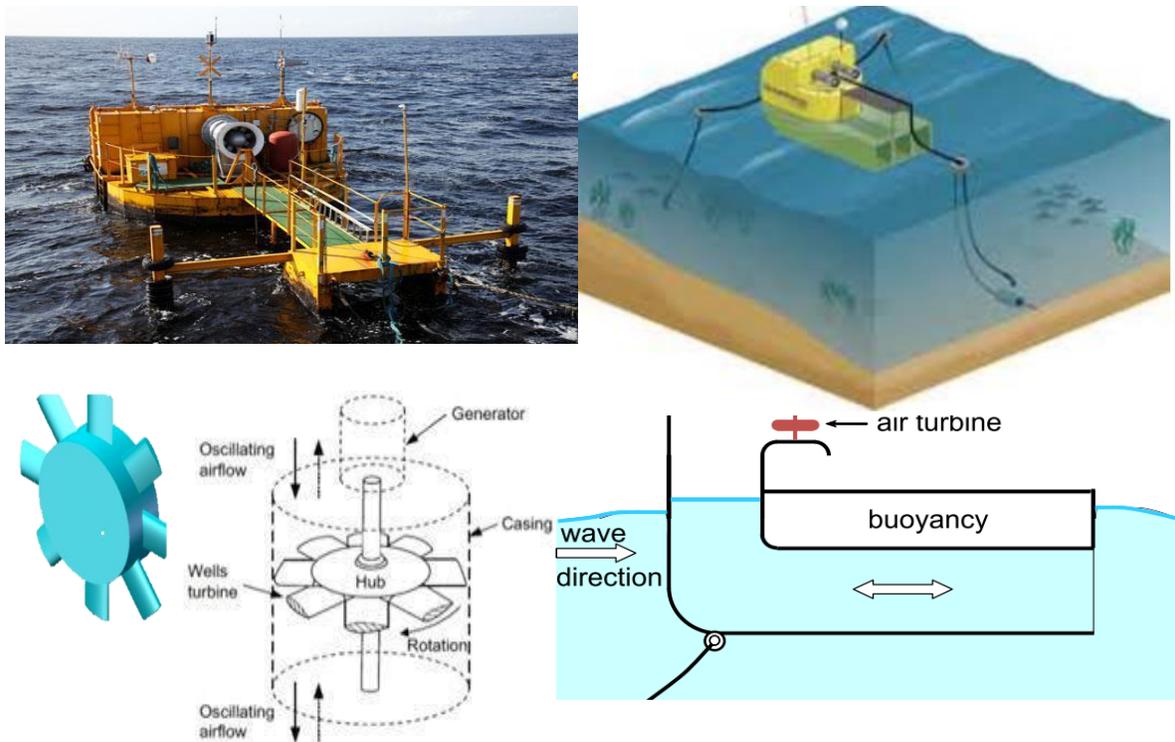


Figura 13. Selección imágenes y esquemas del concepto del dispositivo *Ocean Energy buoy(OE)* (Falcao & Henriques, 2016).

8. Resultados

8.1. Sitios

Los resultados del análisis del régimen de oleaje en los sitios propuestos se presentan a continuación. De la figura 14 a 23 se muestran los diagramas de distribución bivariada ó conjunta para cada sitio. En la figura 14 se puede observar el estado de mar de acuerdo a la serie de tiempo de 23 años en Campo López, donde la mayor densidad de ocurrencias está dada por alturas de ola de 0.8 a 1.5 m y asociadas a periodos de 12 a 17 segundos. Las figuras 16, 17 y 18 representan el estado de mar de Isla Todos Santos, El Retiro y Santo Tomás se observa una mayor concentración de las ocurrencias de oleaje en alturas de 0.8 a 2 m y periodos entre 12 a 17 segundos. Estos sitios están ubicados más cerca de la costa por lo cual explicaría un mayor ordenamiento del oleaje. En el caso de los sitios Eréndira, Colonet, Isla San Martín y el Rosario ubicados en la parte intermedia de la zona de estudio figura 18, 19, 20 y 21 respectivamente se presenta un oleaje más disperso en parte debido a una mayor incidencia estacional del oleaje proveniente del hemisferio sur con periodos más cortos.

Para los sitios ubicados al sur de la zona de estudio, frente a las Islas Guadalupe y Cedros figuras 22 y 23 respectivamente se puede observar estados de mar más dispersos en altura y periodo, particularmente en el caso de Isla Guadalupe donde se observa claramente dos picos de ocurrencias mayores, entre valores de periodo de 8 a 11 segundos asociados a alturas de 1.5 a 2 m. y a periodos entre 13 y 17 segundos, asociados a alturas de 1.6 a 2.5 m.

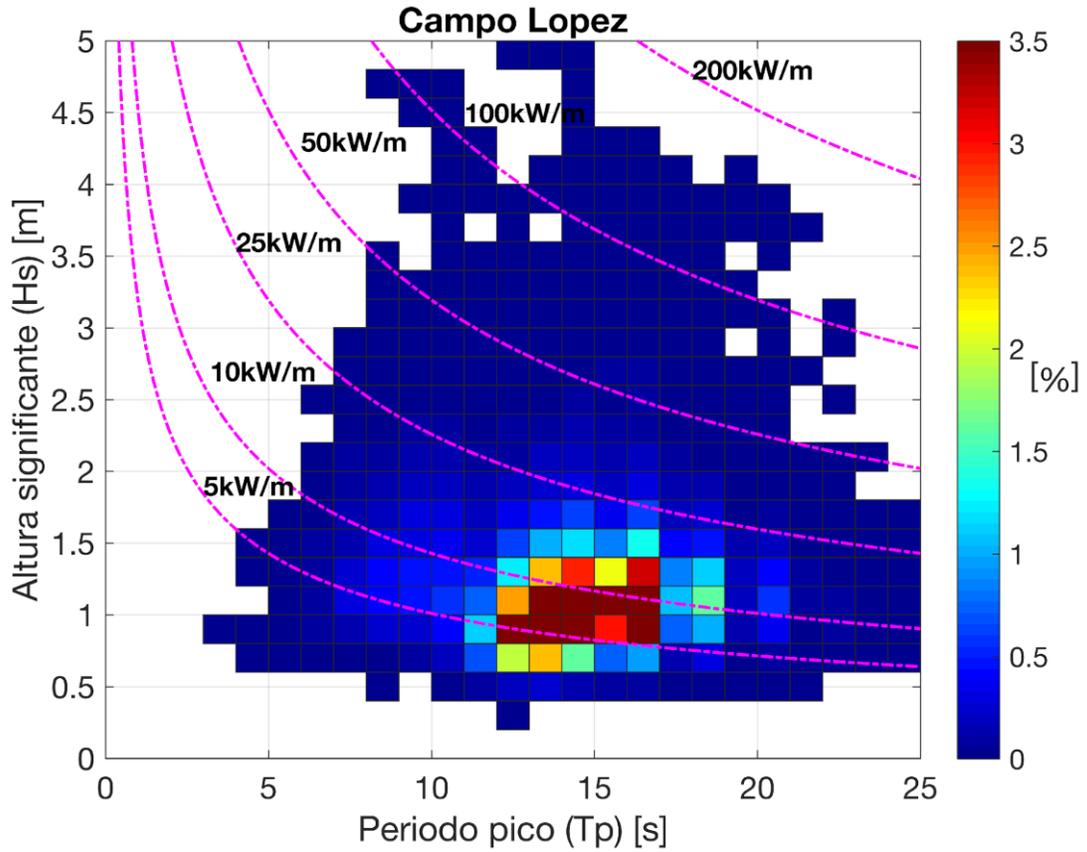


Figura 14. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio Campo López. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.

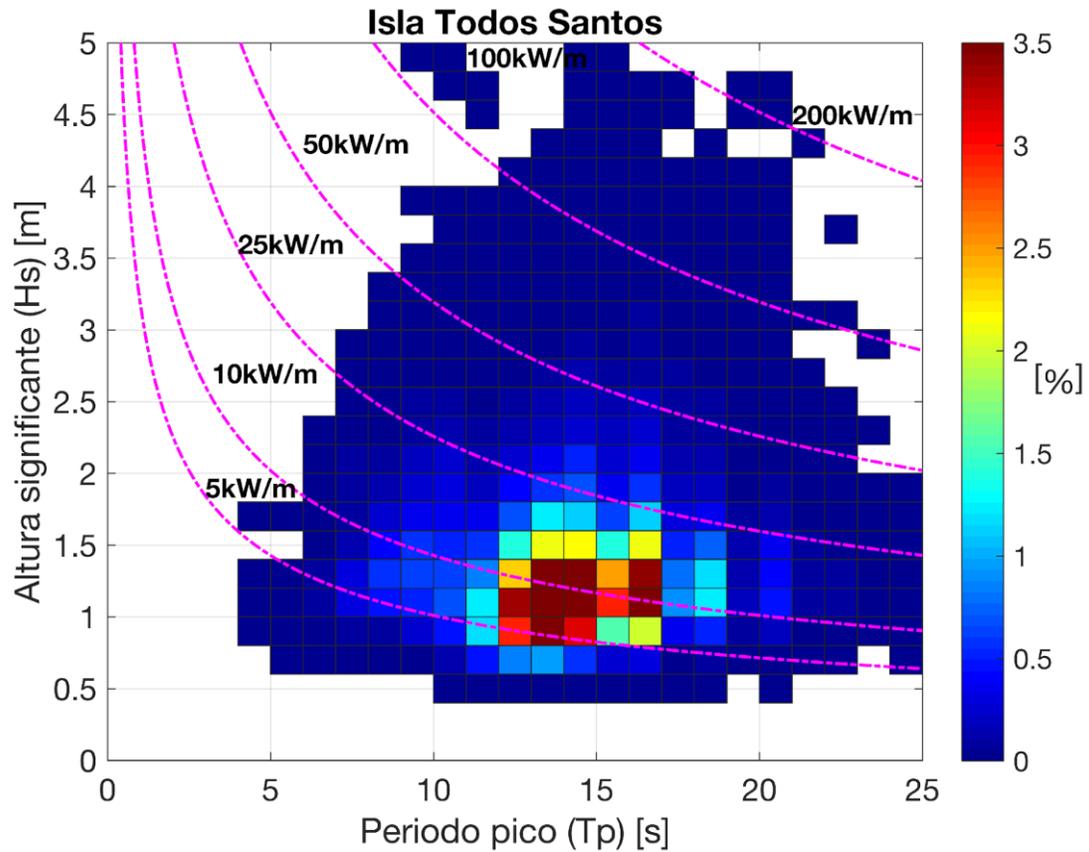


Figura 15. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio Isla Todos Santos. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.

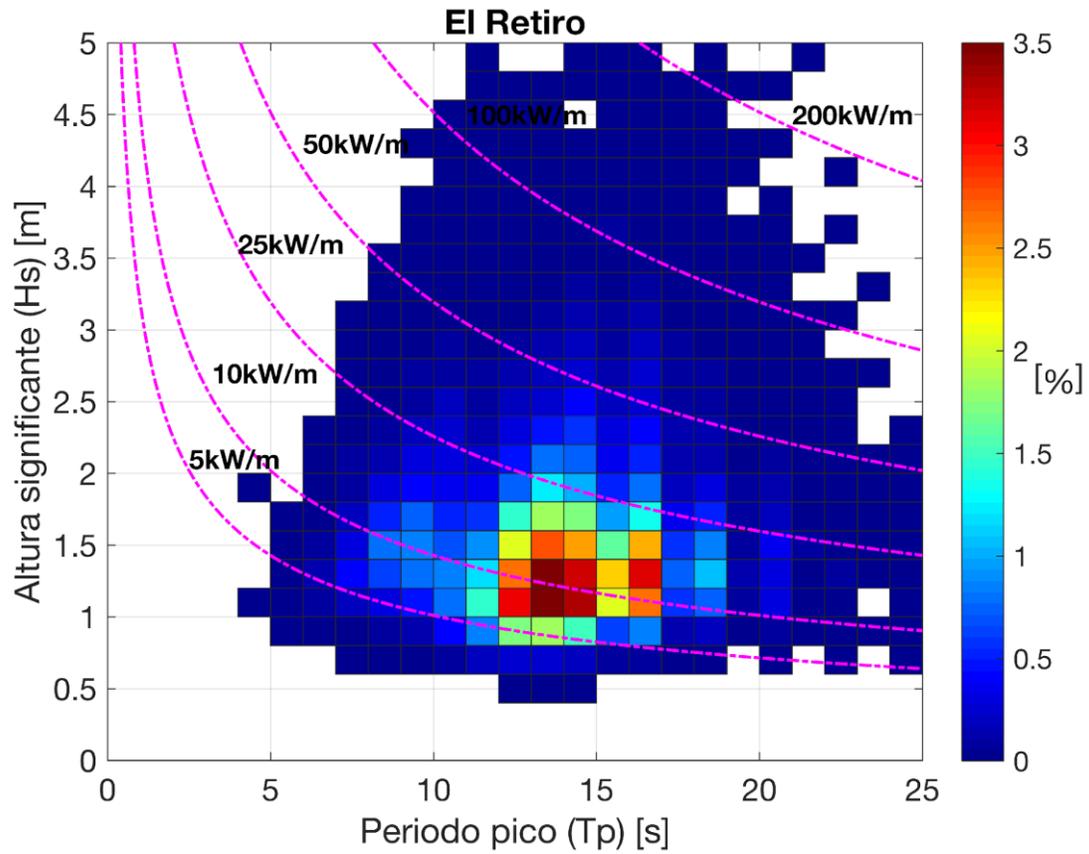


Figura 16. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio El Retiro. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.

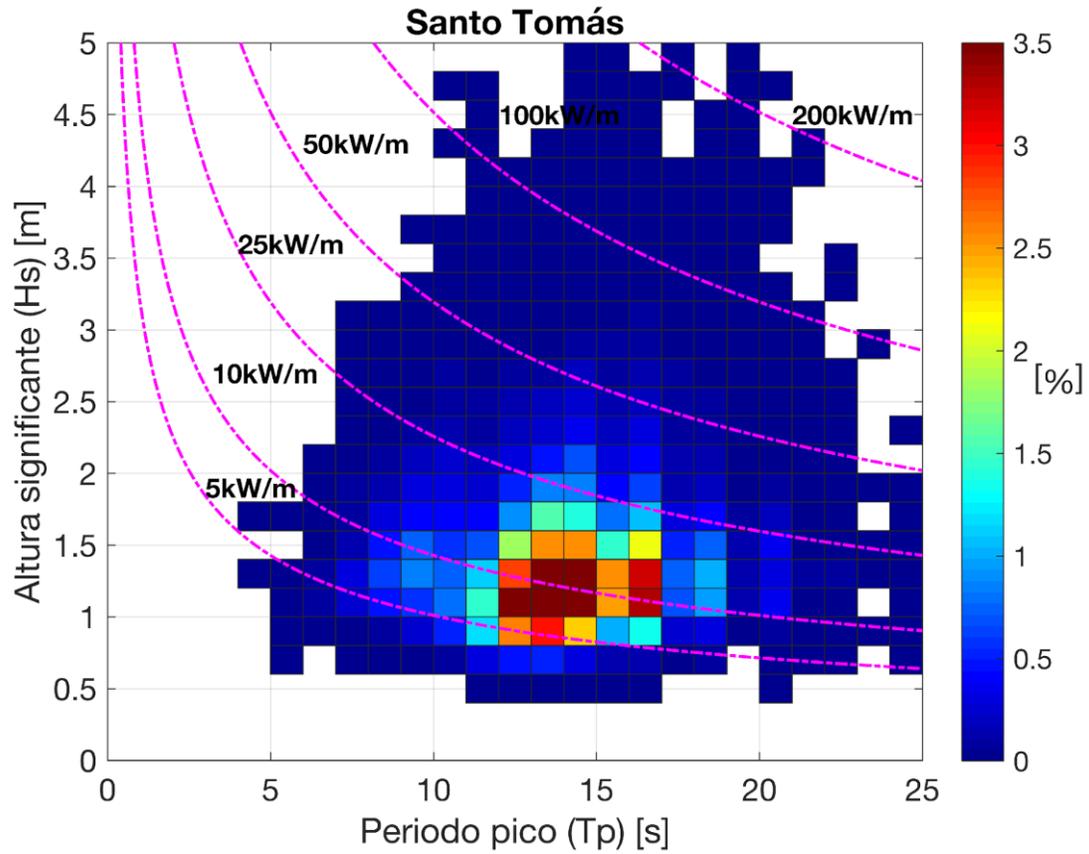


Figura 17. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por H_s y T_p en el sitio Santo Tomás. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m .

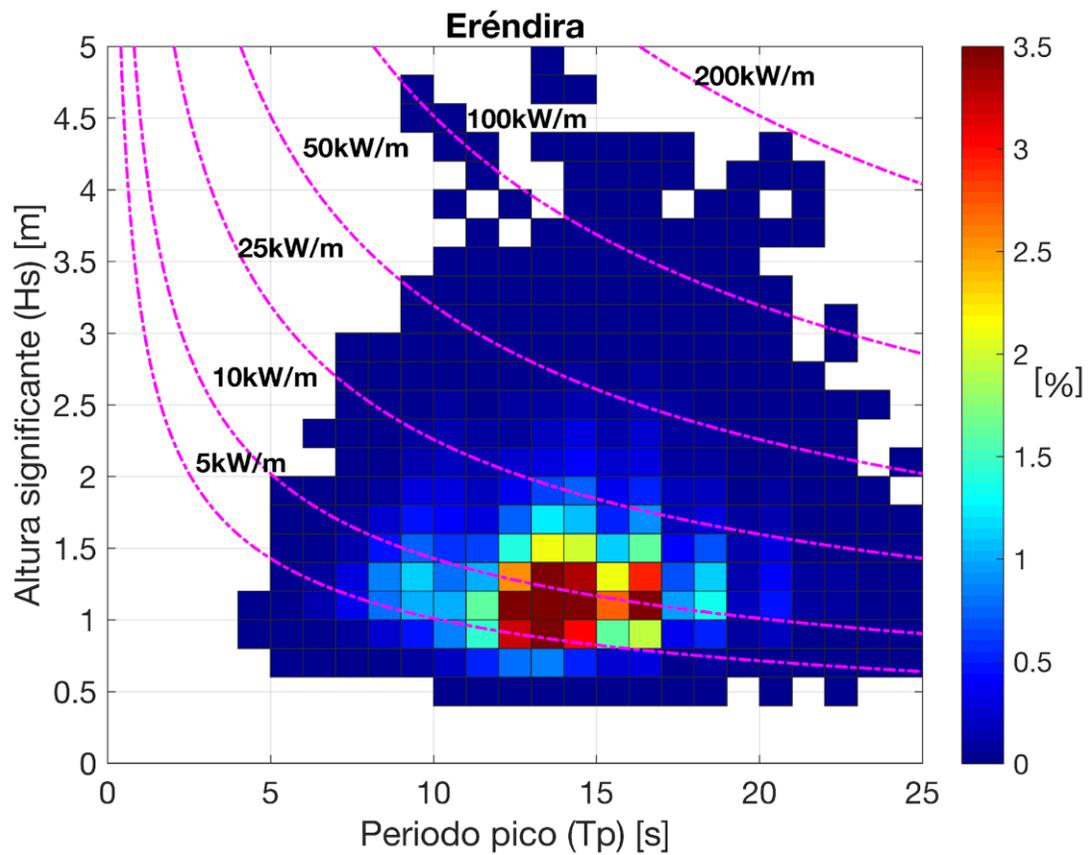


Figura 18. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por H_s y T_p en el sitio Eréndira. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isóneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.

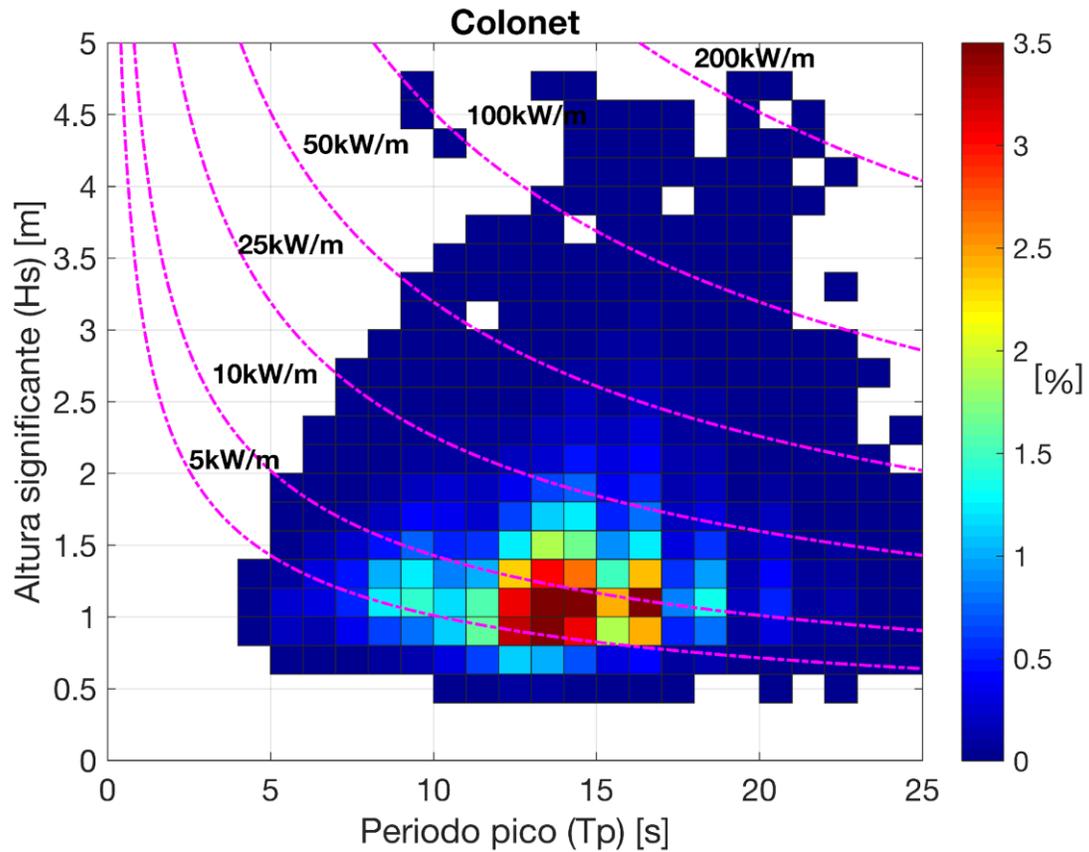


Figura 19. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por H_s y T_p en el sitio Colonet. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isólinas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.

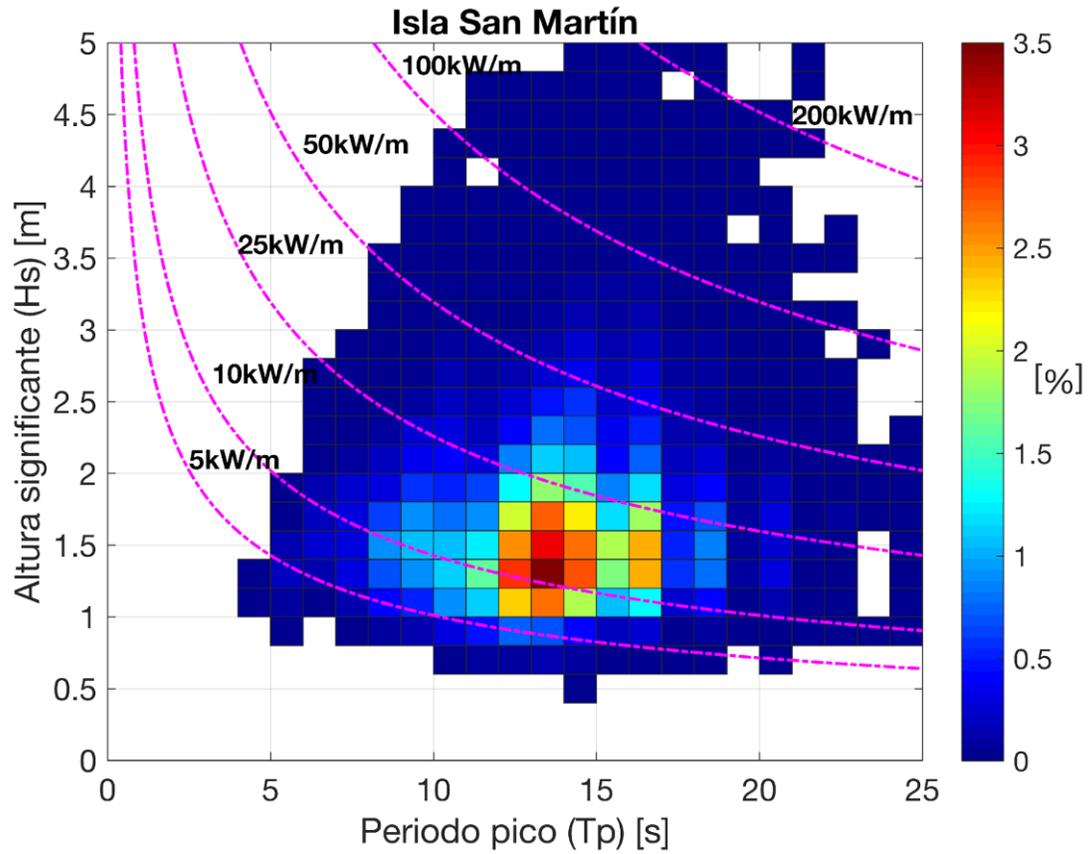


Figura 20. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por H_s y T_p en el sitio Isla San Martín. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.

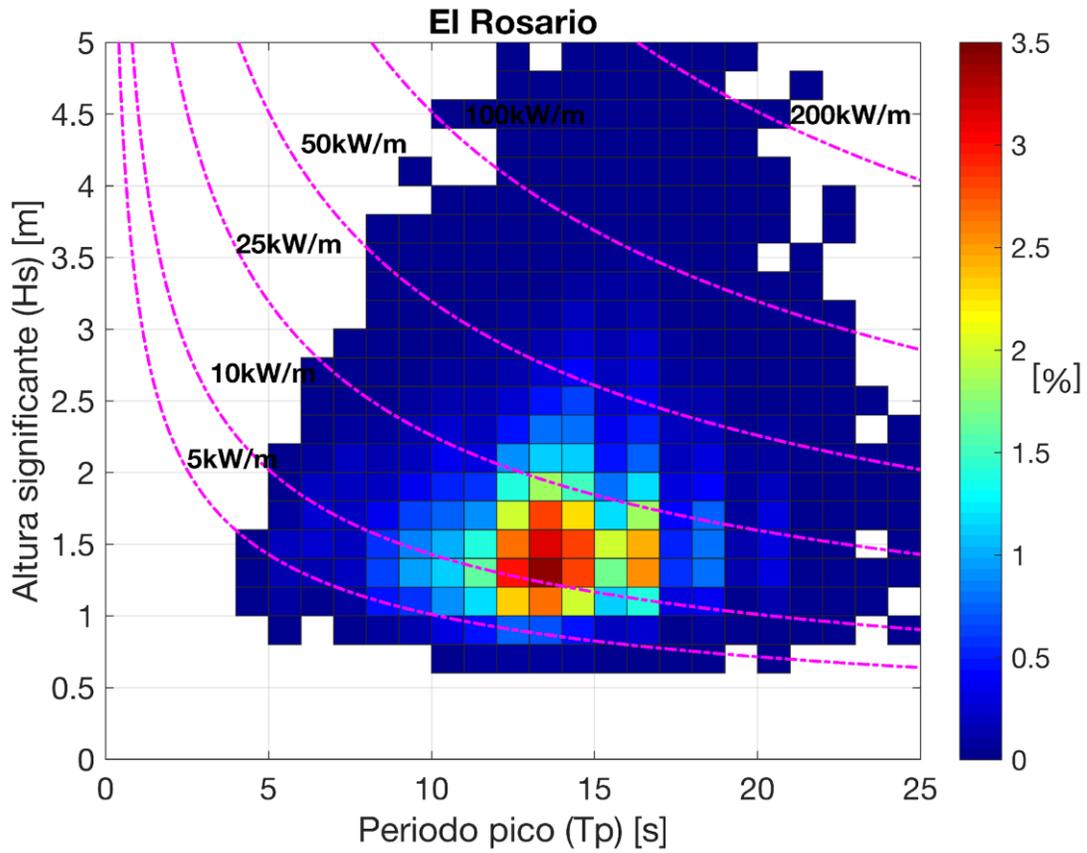


Figura 21. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por Hs y Tp en el sitio El Rosario. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.

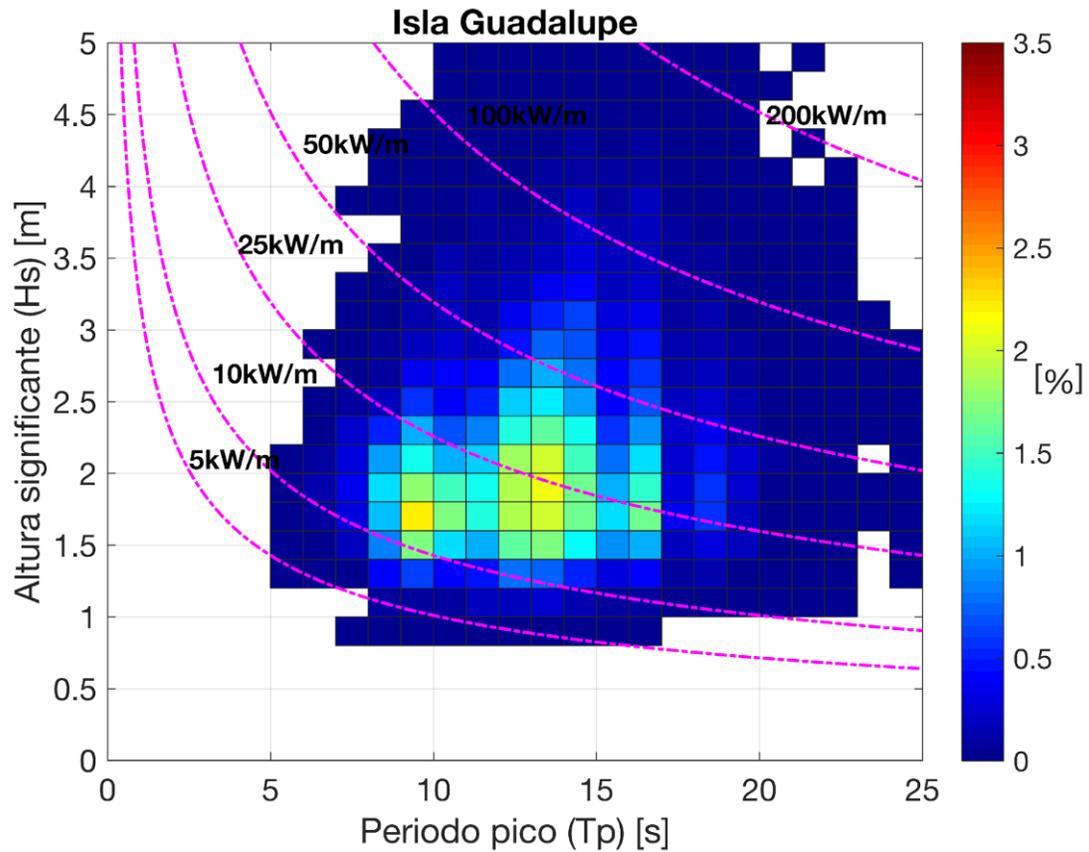


Figura 22. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por H_s y T_p en el sitio Isla Guadalupe. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m.

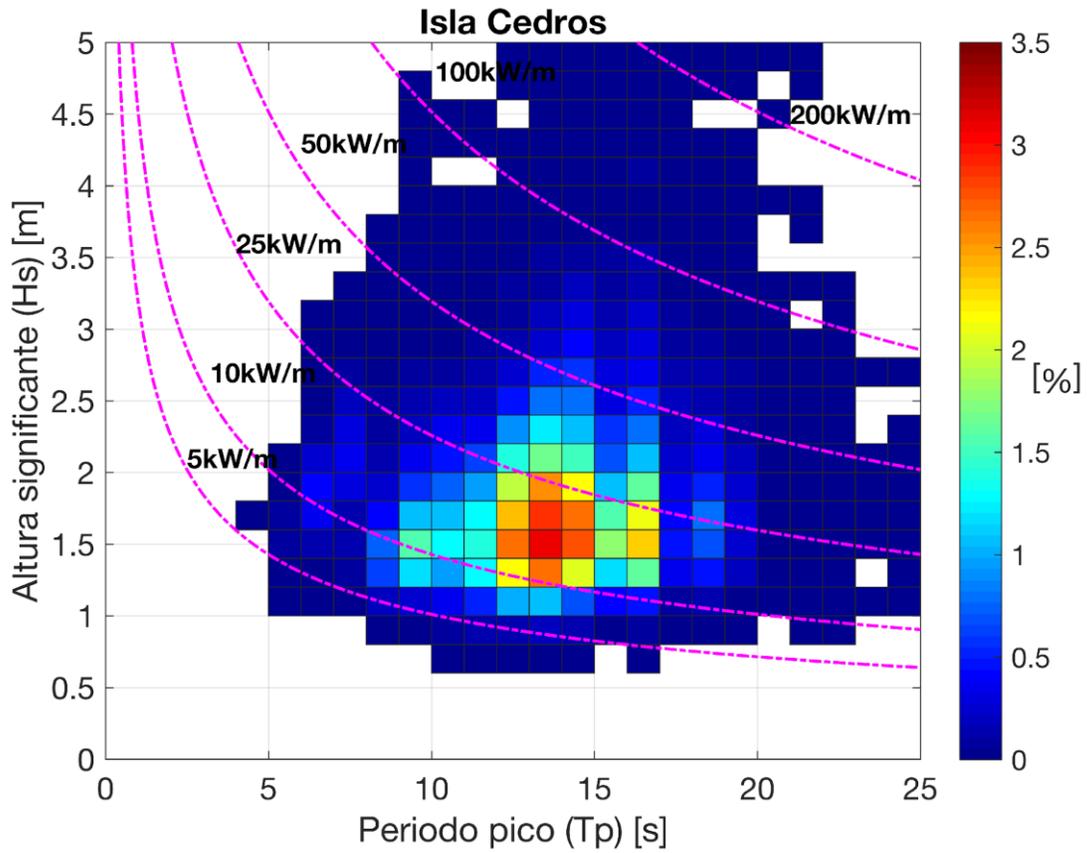


Figura 23. Diagrama de dispersión bivariada de las ocurrencias correspondientes al estado de mar definidos por H_s y T_p en el sitio Isla Cedros. En la barra de color se muestra el porcentaje de ocurrencia, las isolíneas indican el potencial energético en el rango de 5 kW/m a 200 kW/m .

En la figura 24 se muestran los promedios mensuales de potencia estimada de todos los sitios. Los valores más altos en todos los sitios están representados por los valores de invierno, mientras que los más bajos por los de verano. Los sitios más energéticos son Isla Guadalupe e Isla Cedros, alcanzando valores máximos de 39 y 28 kW/m, respectivamente para el mes de febrero.

En la tabla III se presentan los índices de variabilidad COV, SV y MV, para cada uno de los sitios. El oleaje más variable se presenta en los El Retiro, Colonet e Isla Todos Santos (COV= 0.96, 0.94, 0.92), mientras que el menos variable en Isla Cedros, El Rosario, Eréndira e Isla Guadalupe (COV=0.76, 0.82, 0.83, 0.83).

En la tabla IV se muestra el potencial energético anual de cada sitio. Los estimados mayores pertenecen a Isla Guadalupe y Cedros 26.7 y 19.4 kW/m, el potencial energético menor pertenecen a Campo López y Colonet 8.5 y 10 kW/m respectivamente.

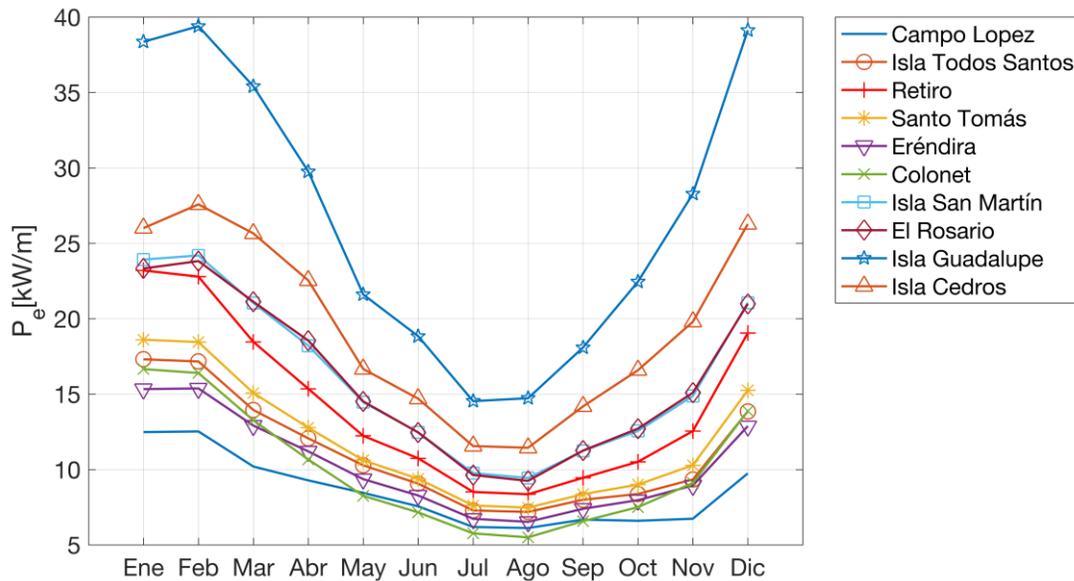


Figura 24. Promedios mensuales de potencial energético para cada uno de los sitios propuestos.

Sitios	COV	SV	MV
Campo López	0.89	0.58	0.76
Isla Todos Santos	0.92	0.74	0.92
El Retiro	0.96	0.88	1.05
Santo Tomás	0.90	0.78	0.94
Eréndira	0.83	0.72	0.87
Colonet	0.94	0.95	1.12
Isla San Martín	0.84	0.78	0.93
El Rosario	0.82	0.77	0.92
Isla Guadalupe	0.83	0.87	0.94
Isla de Cedros	0.76	0.73	0.84

Tabla III. Coeficiente de variabilidad, variabilidad estacional y variabilidad mensual para cada uno de los sitios propuestos

Sitio	P(kW/m)
Campo López	8.544
Isla Todos Santos	11.153
El Retiro	14.266
Santo Tomás	11.905
Eréndira	10.240
Colonet	10.058
Isla San Martín	16.101
El Rosario	16.058
Isla Guadalupe	26.713
Isla de Cedros	19.414

Tabla IV. Potencial energético anual estimado para cada uno de los sitios propuestos.

8.2. Dispositivos CEO

En la siguiente sección se muestran los resultados relacionados con el desempeño de los diversos dispositivos convertidores de energía del oleaje. En la Tabla V se presenta una comparación de características técnicas de los dispositivos CEO analizados. Se muestran los tipos de clasificación más utilizados, que son: de acuerdo al principio de captación, a la ubicación respecto a la costa, a su estructura u orientación respecto al oleaje, dimensiones, PTO, potencia nominal, estadio ó etapa de desarrollo y país donde se desarrolla.

En las figuras 25 a 34 se exponen los promedios mensuales de potencia extraíble de cada CEO para cada sitio. En todos los sitios el dispositivo que muestra un mayor potencial energético extraíble es el dispositivo *Oyster* en especial durante la temporada de invierno. En los sitios localizados en la parte Norte e intermedia de la costa occidental de Baja California se observan valores máximos durante el mes de febrero. De acuerdo a los resultados, los valores máximos de energía extraída por el dispositivo *Oyster* son: 141.5 kW en Campo López, 188 kW en Isla Todos Santos, 246.2 kW en El Retiro, 202 kW en Santo Tomás, 170 kW en Eréndira, 167 kW en Colonet, 263.1 kW en Isla San Martín y 258.3 kW en El Rosario, figuras 15 a 22 respectivamente. En el caso de los sitios ubicados en la zona Sur de la costa occidental de Baja California (Isla Guadalupe, Isla Cedros), se observan valores máximos de energía extraíble de 429.1 kW durante Marzo y 307.14 kW durante el mes de Abril (Figuras 34 y 35) de igual forma para el dispositivo *Oyster*. Sin embargo, los valores de energía extraíble decrecen considerablemente durante la temporada de verano para todos los CEO, pero particularmente es más evidente para el dispositivo *Oyster*.

Los dispositivos que presentaron valores considerables pero menores al dispositivo *Oyster*, fueron *Wavestar*, *Pontoon*, *Wavebob*, *OE bouy* y *Langlee*. En el caso del *Wavestar* y *Pontoon* presentaron valores máximos en el sitio Isla de Guadalupe durante Febrero con 254.9 kW y en Junio con 210.4 kW, respectivamente. El sistema *Wavebob* presentó su valor máximo de 141.75 kW en el mes de Abril al igual que el sistema *OE bouy* y con un valor de energía extraída

similar de 140 kW. El dispositivo *Langlee* por su parte obtuvo un estimado máximo de 67.6 kW en el mismo sitio, pero para el mes de junio, para todos los sitios este dispositivo tuvo un mejor desempeño no precisamente en los meses más energéticos sino en los meses de, Abril, Mayo y Junio.

Los dispositivos que presentaron valores más bajos de energía extraíble fueron los sistemas *Ceto* y *Sea-based*. Ambos sistemas obtuvieron valores máximos en el sitio Isla Guadalupe durante el mes de junio con 13.5 kW y durante el mes de Abril con 2.5 kW respectivamente.

En la tabla VI se presentan los resultados de potencia anual extraída por cada uno de los CEO. En el mismo orden que se presentaron las características de cada dispositivo; el CEO *Sea-based* indicó su valor anual más alto en el sitio Isla San Martín (3.73 kW), al igual que todos los dispositivos. El sistema *Ceto* presentó 30.16 kW de potencia extraíble como máximo anual. El sistema *Wavebob* produciría 217.44 kW energía extraíble, mientras que el *Wavestar* y *Pontoon* producirían 395.26 y 383 kW respectivamente. El sistema *Oyster* fue el que mayor energía anual produciría con 607.41 kW. Finalmente, los dispositivos *Langlee* y *Ocean Energy buoy (OE)*, producirían 143.52 kW y 243.95 kW respectivamente.

En el caso de los parámetros de desempeño e indicadores de costos. Los primeros se presentaron como histogramas de los valores anuales y de invierno para cada uno de los sitios. Los valores de Factor de capacidad (F_c) fueron mayores para el dispositivo *Oyster* seguido de *Wavestar* ambos en Isla Guadalupe con máximos de 43% y 33% y mínimos en Campo López con 12% y 8% con respectivamente. Los resultados del Ancho de Captura (A_c) fueron mayores en *Oyster* y *Wavestar* con 9.5 y 5.2 metros en los sitios Isla San Martín y El Rosario, mientras que los mínimos fueron *Sea-based* y *Ceto* con 0.07 y 0.29 m, en los sitios Eréndira e Isla San Martín. Respecto a la Razón de ancho de captura (η_1) los valores anuales mayores los obtuvieron *Wavebob* seguido de *Oyster*, en el sitio Isla San Martín con 59.5 y 36.6%. Así mismo se estimó la relación entre la P_{ext} y la masa característica de cada dispositivo, de lo cual se obtuvieron valores máximos por *WaveStar* y *Oyster* con 1.1 y 0.8 kWh/kg. En el caso del índice P_{ext}

por área superficial sumergida los valores máximos fueron por parte de *Oyster* con 1.5MWh/m² y *Sea-based* con 0.46 MWh/m² ambos índices en Isla Guadalupe.

CEO	Principio captación	Dimensiones	Ubicación	Orientación	PTO	Potencia nominal(kW)	Estadio desarrollo	País
Sea-based	Cuerpo boyante con referencia fija	Diametro boya: 3 m.	Offshore (40-100m)	Absorbedor puntual	Generador lineal	15	Pre-comercial	Suecia
Ceto	Cuerpo boyante sumergido con referencia fija	Diametro boya: 7 m.	Nearshore (~20-50m)	Absorbedor puntual	Lineal	240	Pre-comercial	Australia/Francia
Wavebob	Sistema flotante de dos cuerpos	Diametro toro: 20m. Flotante sumergido :50 m.	Offshore	Absorbedor puntual	Lineal	1000	Investigación y desarrollo Escala (1:4)	Irlanda
Wavestar	Arreglo flotantes fijados al fondo	Diametro boya: 5 m No. boyas: 20	Nearshore (~13m)	Multi-Absorbedor puntual	Lineal	600	Investigación y desarrollo Escala (1:2)	Dinamarca
Pontoon	Arreglo de flotantes con ref. estructura sumergida.	Diametro boya: 8m No. boyas: 10	Offshore	Multi-Absorbedor puntual	Amortiguamiento Coulomb	3619	Investigación y desarrollo Escala (1:10)	Noruega
Oyster	Paleta oscilante fijada al fondo	Ancho: 26m. Alto: 16 m.	Nearshore (~15m)	Totalizador/ Impacto	Lineal	800	Pre-comercial	Escocia
Langlee	Paleta flotante oscilante de tres partes	Ancho: 9.5 m. Alto: 8.5 m Cuadro:10x 25m	Offshore	Totalizador/ Impacto	Lineal motor hidraulico	1665	Pre-comercial	Noruega
OE buoy	Columna de agua oscilante, flotante	Largo:50m Ancho:24m Sumergido:13m	Offshore	Atenuador/ Flotante con ducto curvado contrario oleaje	Lineal	2880	Investigación y desarrollo Escala (1:4)	Irlanda

Tabla V. Características principales de los CEO analizados.

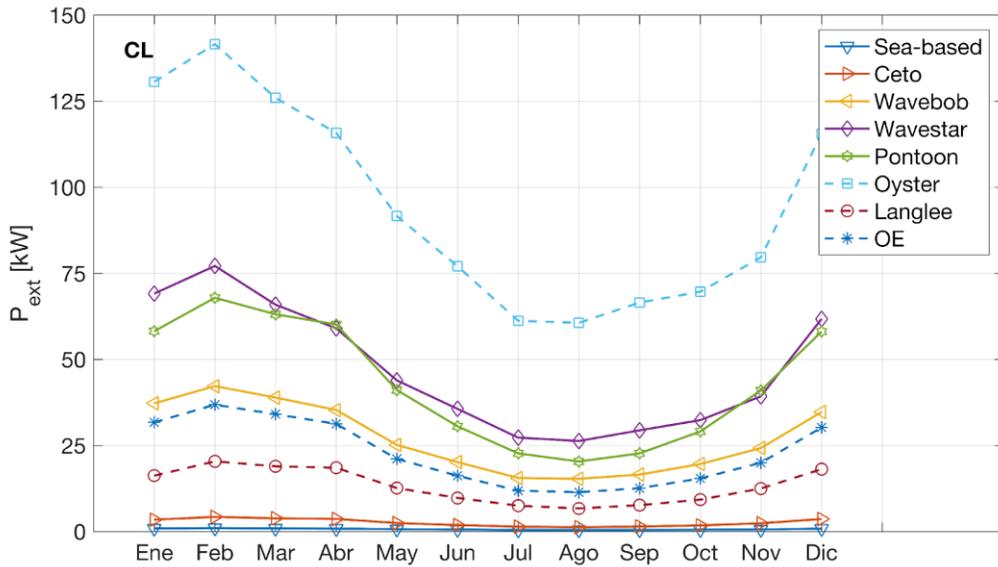


Figura 25. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Campo López.

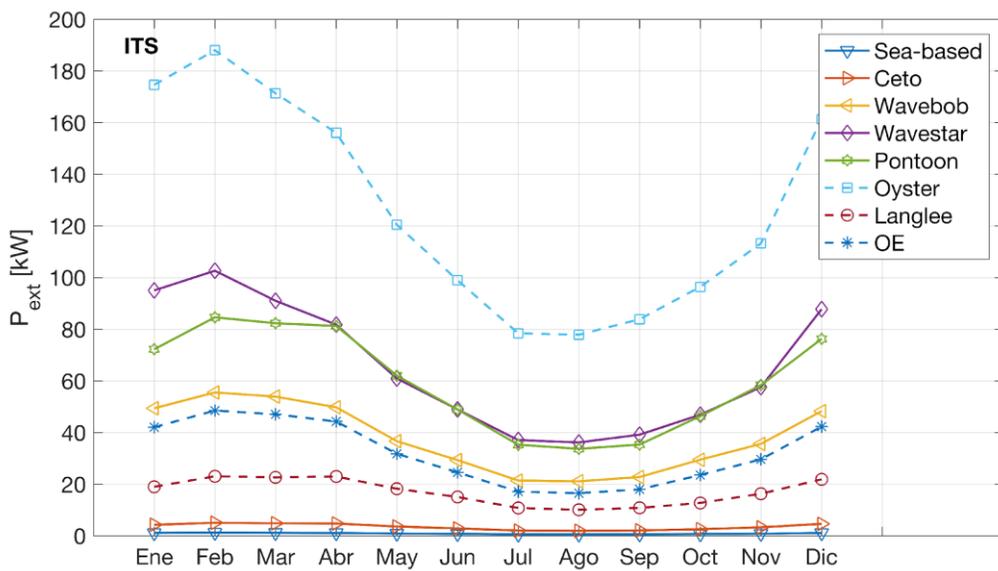


Figura 26. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Isla Todos Santos.

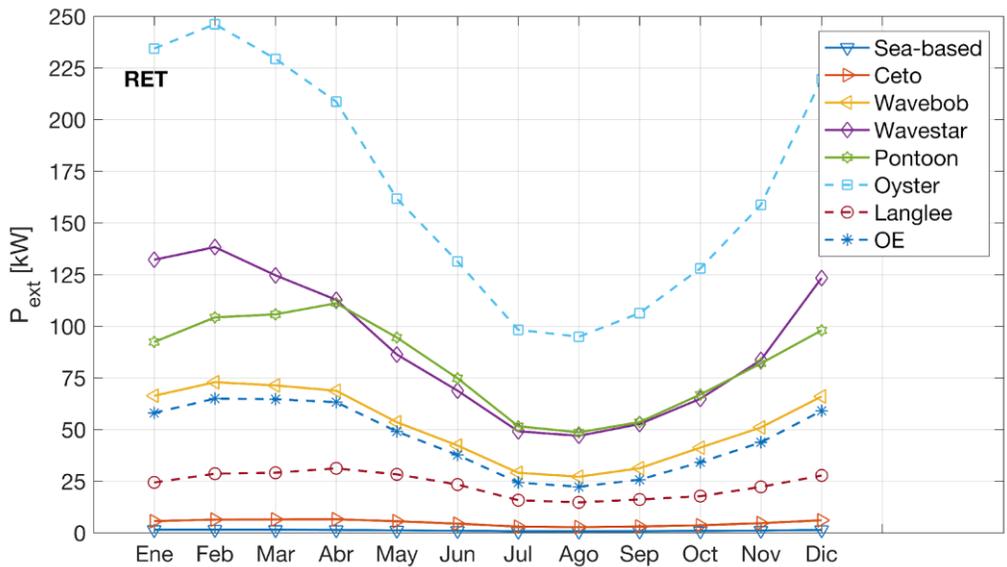


Figura 27. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio El Retiro.

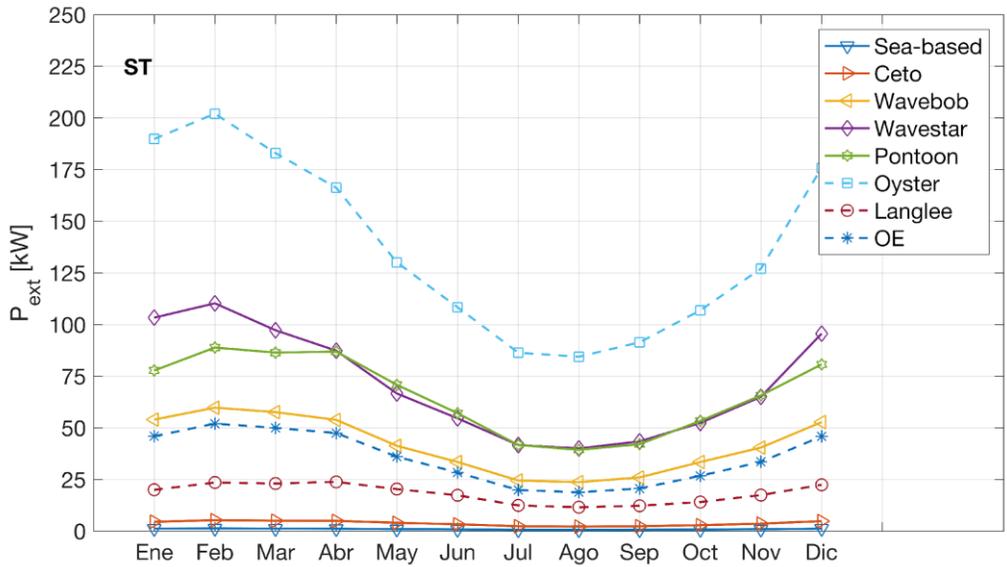


Figura 28. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Santo Tomás.

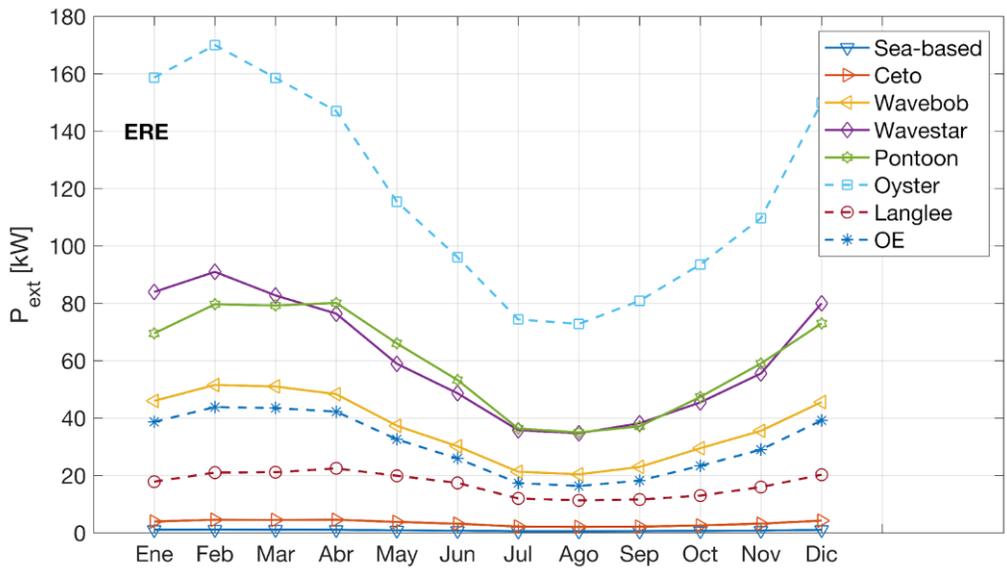


Figura 29. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Eréndira.

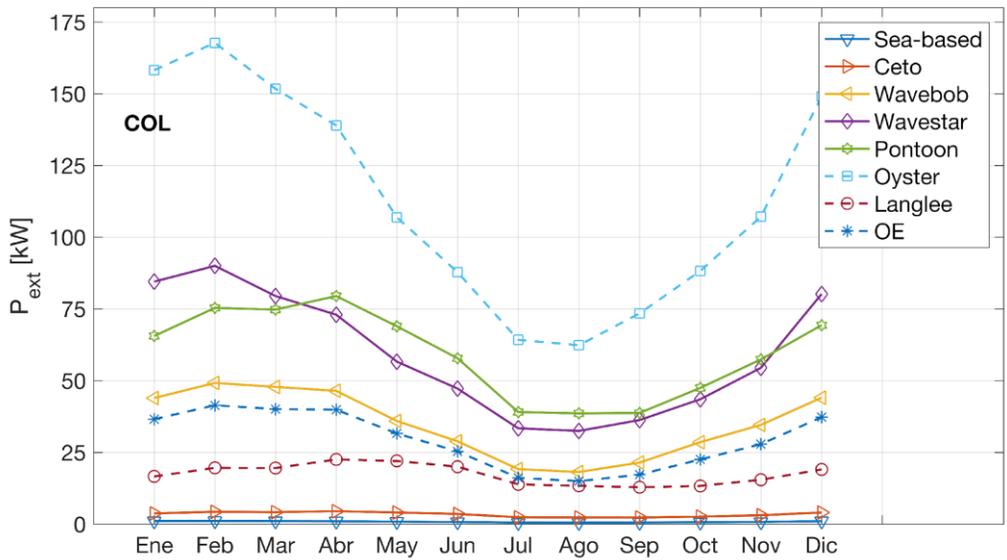


Figura 30. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Colonet.

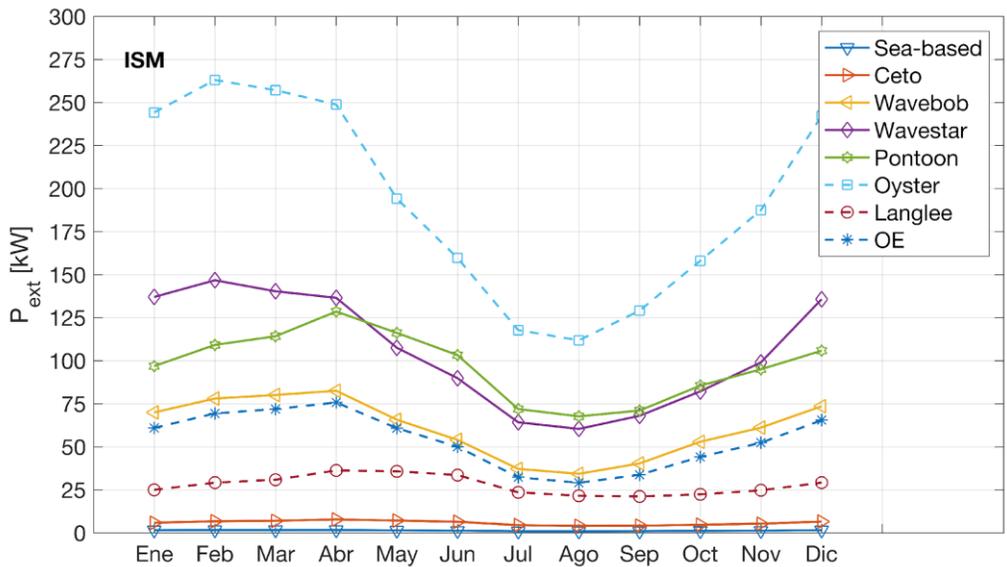


Figura 31. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Isla San Martín.

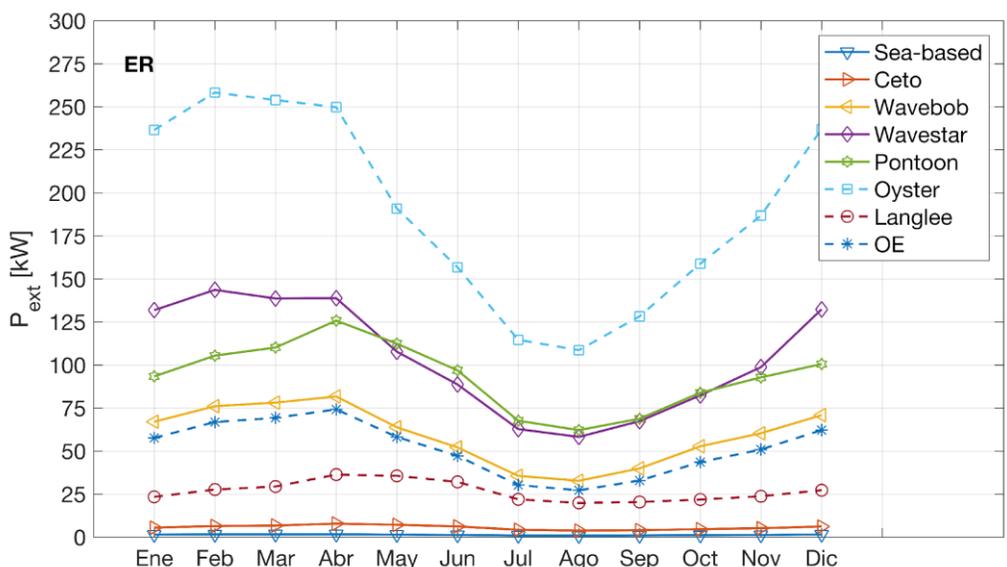


Figura 32. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio El Rosario.

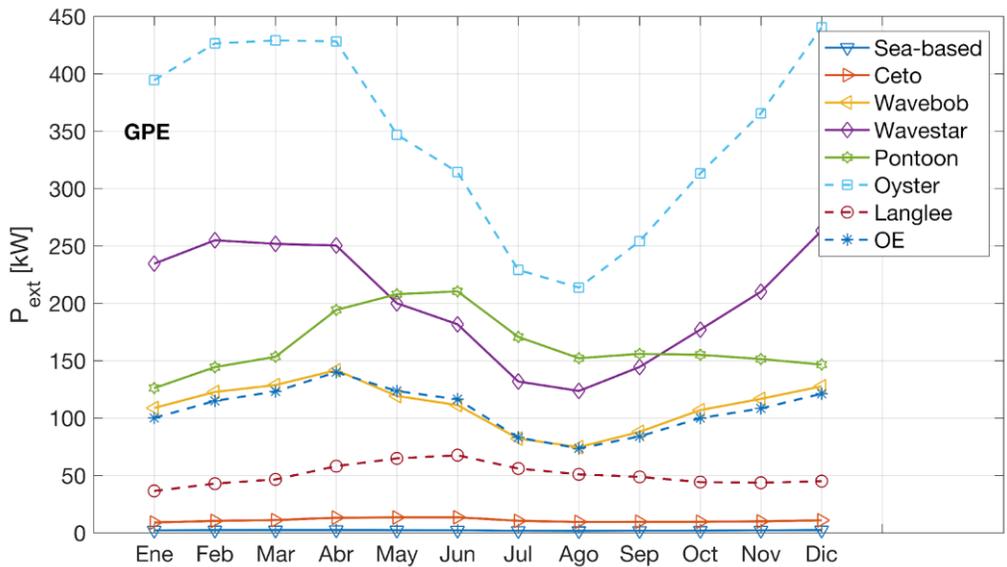


Figura 33. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Isla Guadalupe.

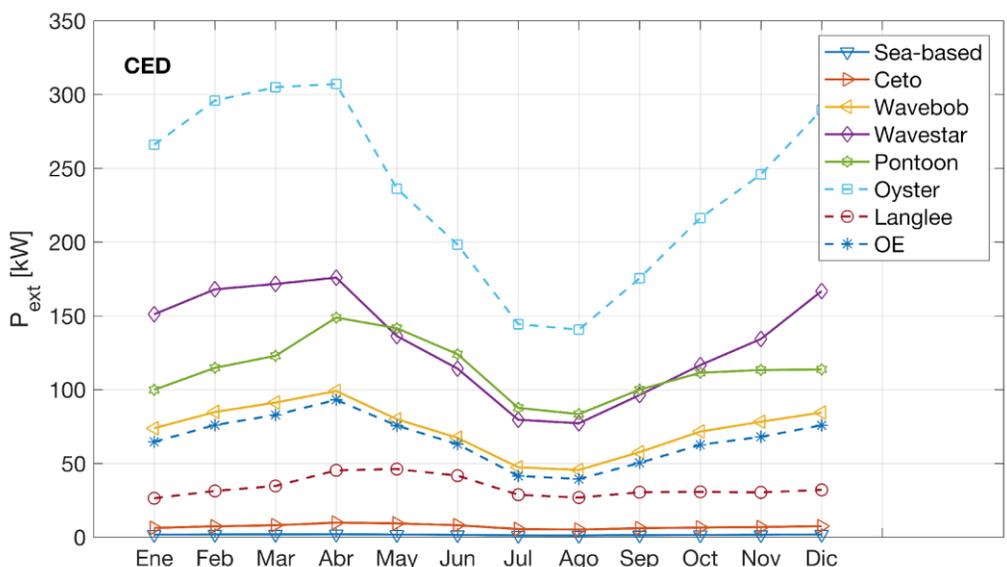


Figura 34. Promedios mensuales de potencia extraíble para cada uno de los CEO en el sitio Isla Cedros.

Sitios	Sea-b	Ceto	WaveBob	WaveStar	Ponton	Oyster	Langlee	OE
Campo López	0.69	2.63	27.09	47.25	42.91	94.65	13.19	22.73
Isla Todos Santos	0.91	3.50	37.78	65.43	59.73	126.75	16.97	32.12
Retiro	1.18	4.88	51.77	90.34	82.00	168.18	23.30	45.60
Santo Tomás	0.98	3.80	41.75	71.47	65.91	137.64	18.20	35.45
Eréndira	0.87	3.43	36.65	60.95	59.66	118.93	17.00	30.86
Colonet	0.85	3.44	34.87	59.29	59.40	113.00	17.37	29.26
Isla San Martín	1.36	5.85	60.82	105.63	97.11	192.8	27.76	53.83
El Rosario	1.35	5.69	59.28	104.28	93.34	190.04	26.64	51.72
Isla Guadalupe	2.22	10.92	110.77	202.01	164.08	346.33	50.46	107.39
Isla Cedros	1.63	7.21	73.42	132.32	113.45	235.05	33.71	66.06

Tabla VI. Resultados de potencia anual extraíble de cada convertidor de energía del oleaje, evaluados con condiciones de oleaje presentes en los distintos sitios propuestos. Valores estimados en kW.

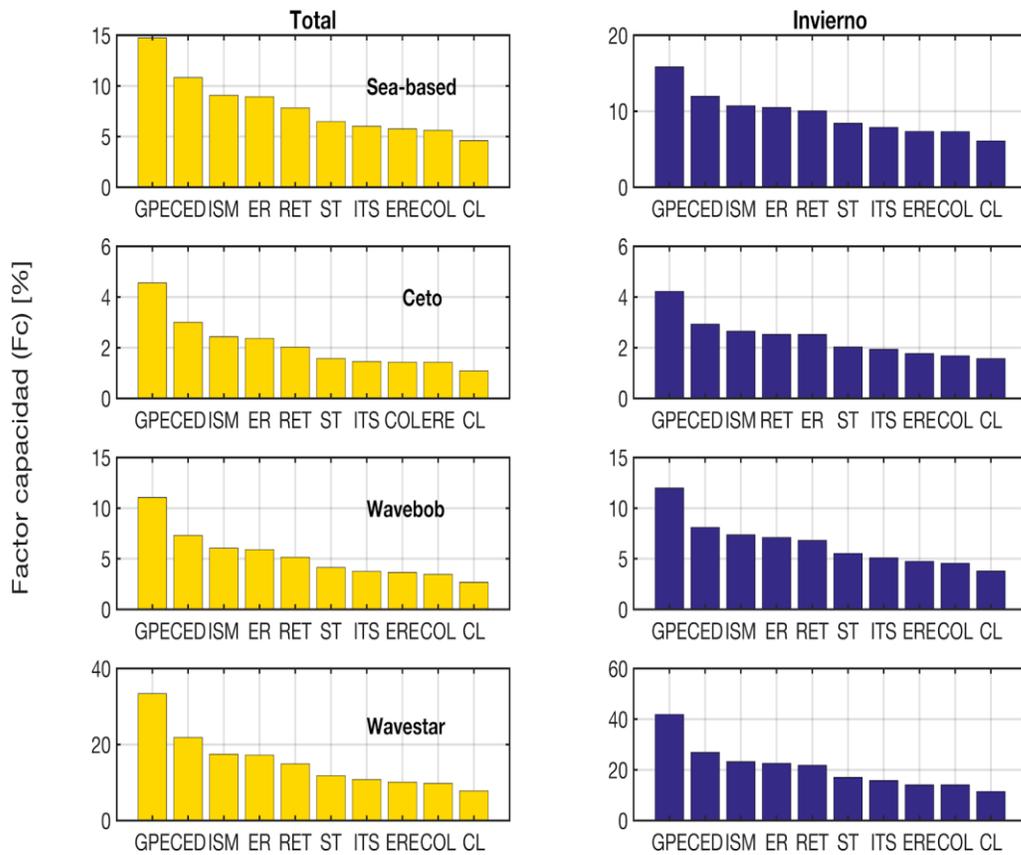


Figura 35. Resultados del Factor de capacidad (Fc) para los dispositivos *Sea-based*, *Ceto*, *Wavebob* y *Wavestar*. En la primera columna y de color amarillo se presentan los valores totales de Fc, en la segunda columna y de color azul se presentan los valores de Fc para invierno. Los estimados se presentan en porcentajes (%).

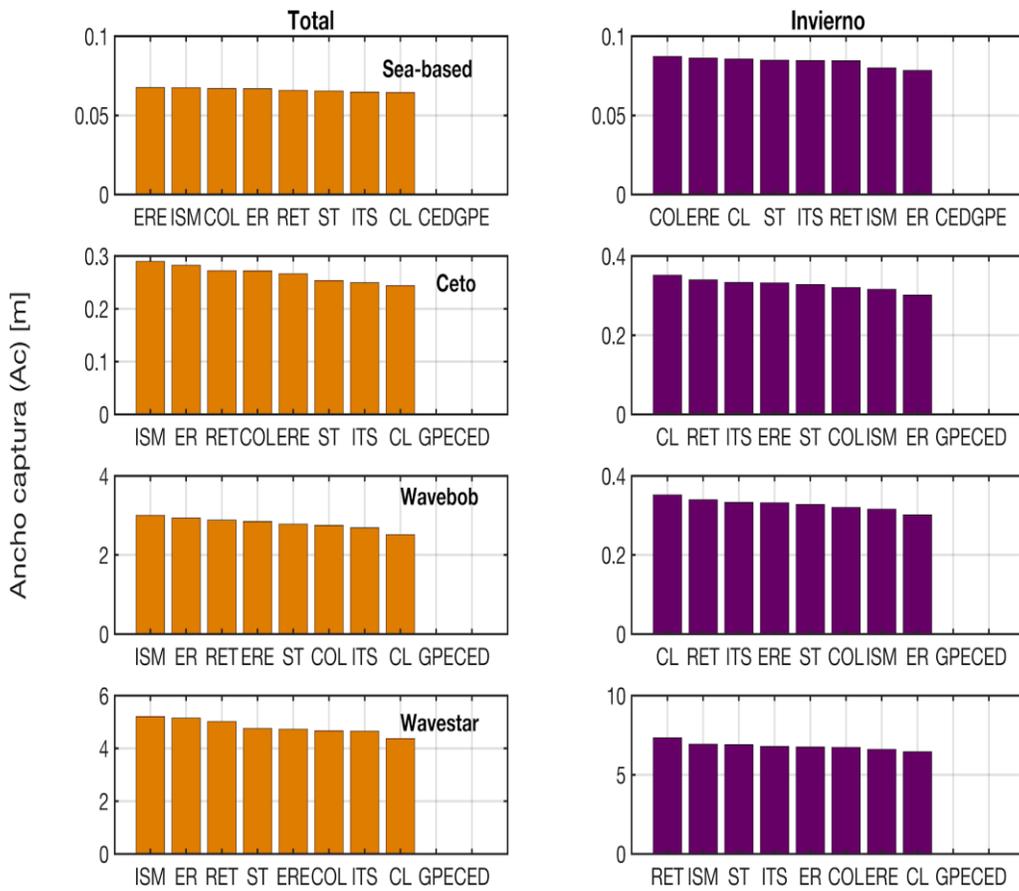


Figura 37. Resultados de Ancho de captura (Ac) para los dispositivos *Sea-based*, *Ceto*, *Wavebob* y *Wavestar*. En la primera columna y de color naranja se presentan los valores de Ac totales, en la segunda columna y de color púrpura se presentan los valores de Ac para la estación de invierno. Los estimados se presentan en metros (m).

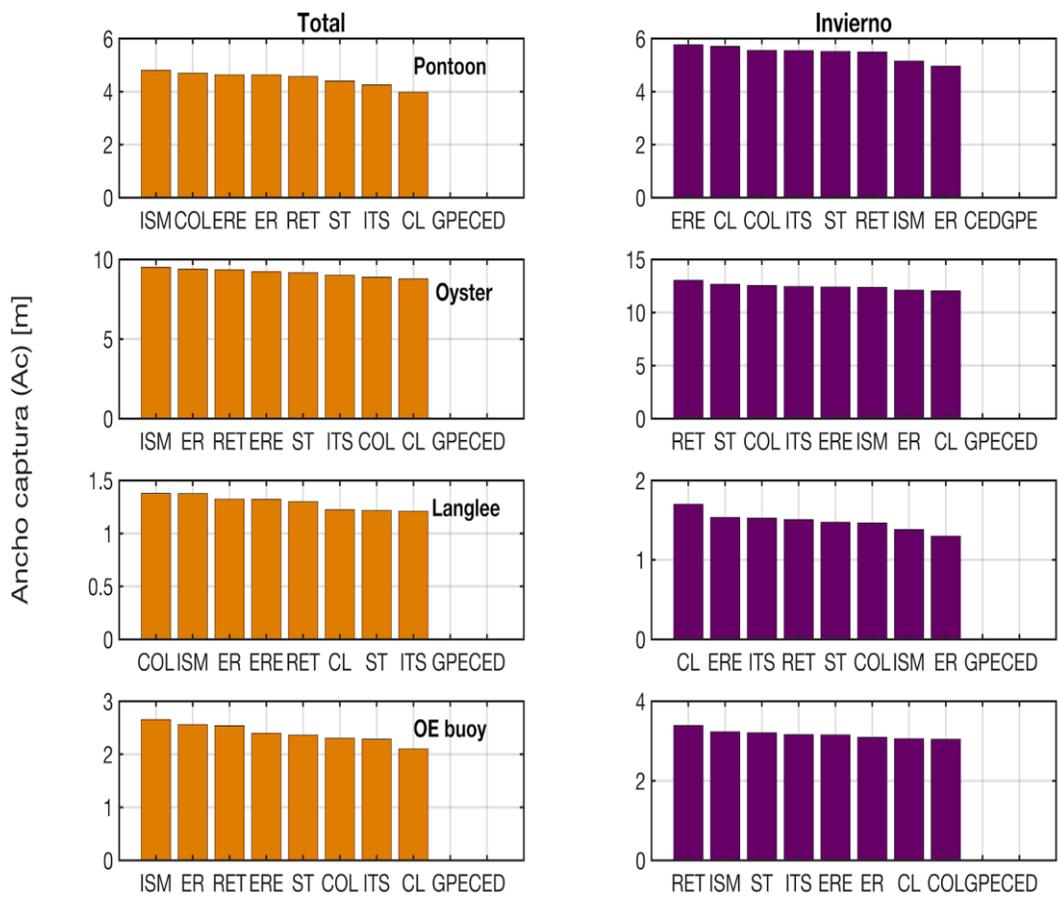


Figura 38. Resultados de Ancho de captura (Ac) para los dispositivos *Pontoon*, *Oyster*, *Langlee* y *OE buoy*. En la primera columna y de color naranja se presentan los valores de Ac totales, mientras que en la segunda columna y de color púrpura se presentan los valores de Ac para la estación de invierno. Los estimados se presentan en metros (m).

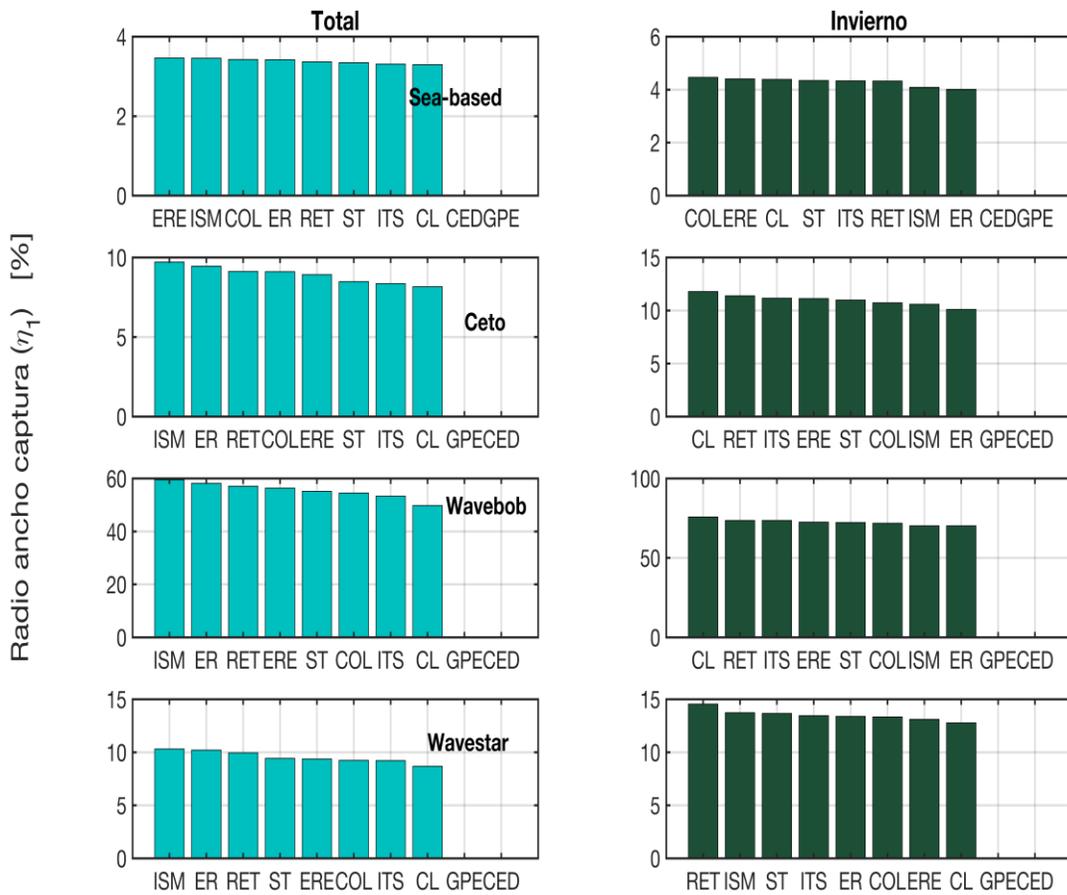


Figura 39. Resultados de la razón de ancho de captura (η_1) para los dispositivos *Sea-based*, *Ceto*, *Wavebob* y *WaveStar*. En la primera columna y de color verde-azul se presentan los valores de (η_1) anuales, mientras que en la segunda columna y de color verde oscuro se presentan los valores de (η_1) para la estación de invierno. Los estimados se presentan en porcentajes (%).

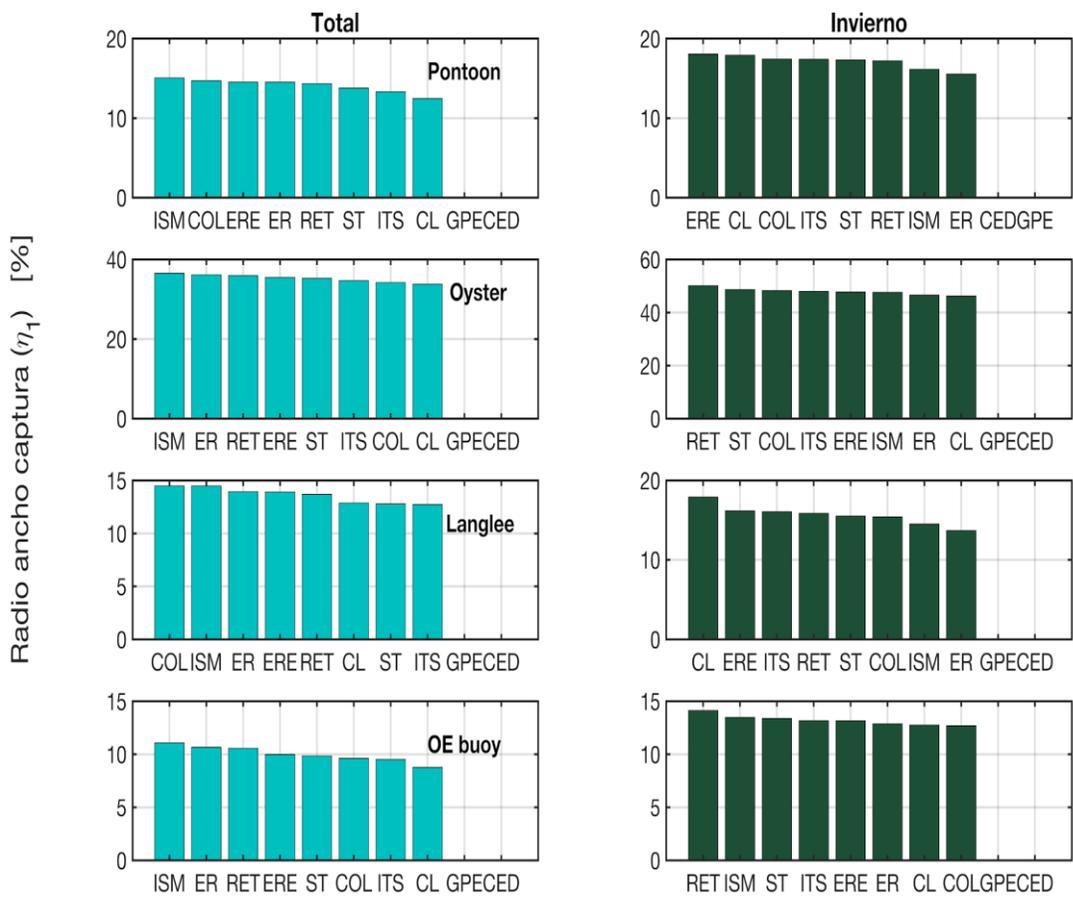


Figura 40. Resultados de la razón de ancho de captura (η_1) para los dispositivos *Pontoon*, *Oyster*, *Langlee* y *OE buoy*. En la primera columna y de color verde-azul se presentan los valores de (η_1) totales, mientras que en la segunda columna y de color púrpura se presentan los valores de (η_1) para la estación de invierno. Los estimados se presentan en porcentaje (%).

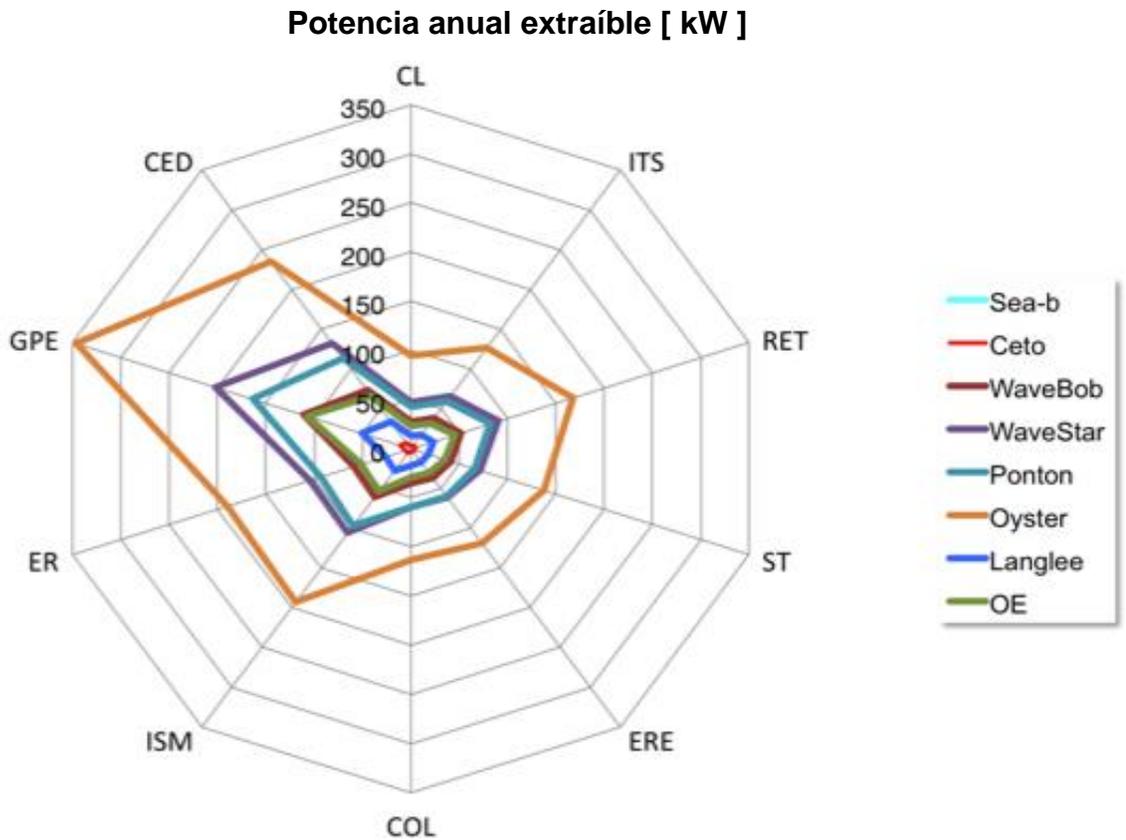


Figura 41. Resultados del promedio anual de potencia extraíble. La escala de colores representa los distintos dispositivos, mientras que en los ejes se muestran los valores obtenidos para cada sitio. Los valores estimados van de 0.1 a 350 kW.

Producción energética anual por masa [kWh/kg]

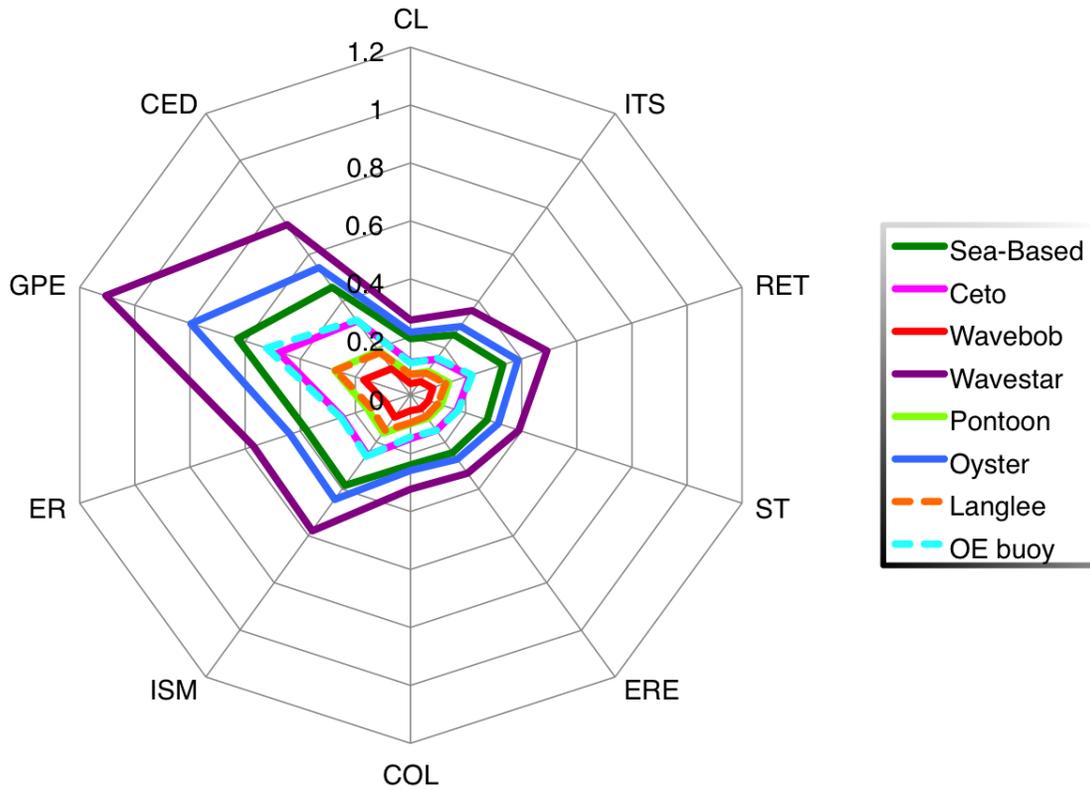


Figura 42. Resultados del parámetro indicador de costo de la relación que existe entre la producción energética anual (kWh) por unidad de masa dada en kilogramos. La escala de colores representa los distintos dispositivos, mientras que en los ejes se muestran los valores obtenidos para cada sitio. Los valores estimados van de 0.1 a 1.1 kWh/kg.

Producción energética anual por área sumergida [MWh/m²]

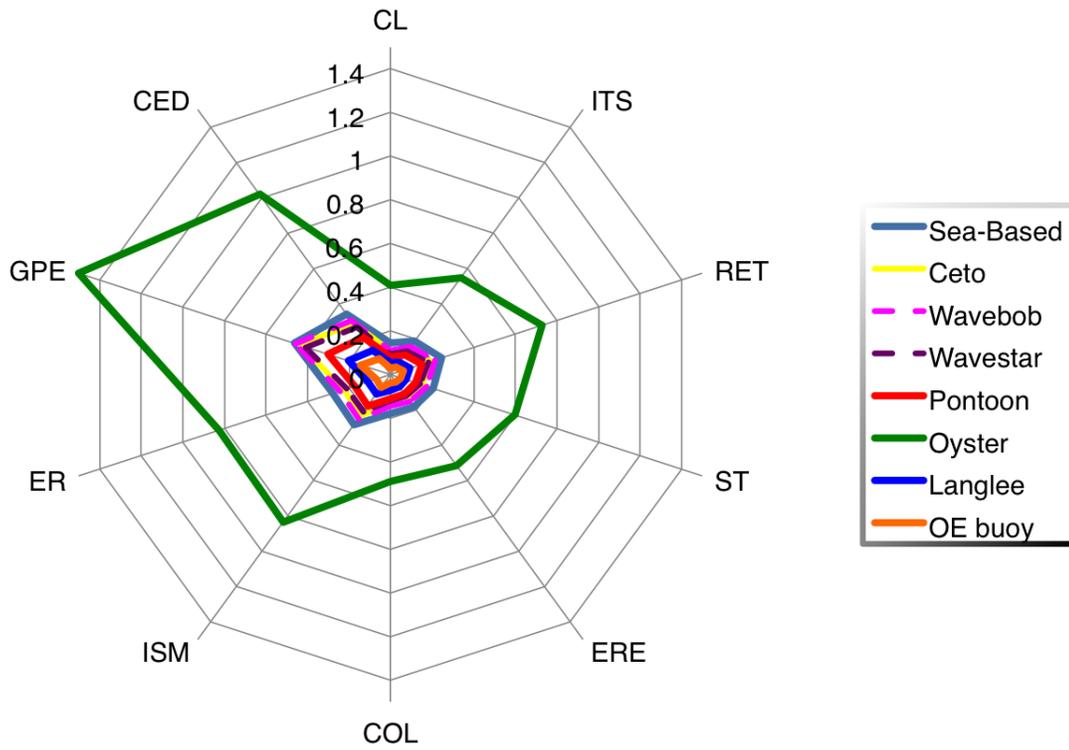


Figura 43. Resultados del parámetro indicador de costo de la relación que existe entre la producción energética anual (MWh) por área sumergida del aparato dada en m². La escala de colores representa los distintos dispositivos, mientras que en los ejes se muestran los valores obtenidos para cada sitio. Los valores estimados van de 0.1 a 1.5 MWh/kg.

9. Discusiones

Para fines prácticos, en la primera sección se discutirán los resultados relativos a la energía del oleaje de la zona de estudio, mientras que en la segunda sección se refiere a los instrumentos CEO.

9.1. Sitios

El potencial energético, en la costa occidental de Baja California varía a lo largo del año con una marcada estacionalidad. El área de estudio es afectada principalmente por lo que sucede en la cuenca del Océano Pacífico. La costa occidental de Baja California recibe oleaje energético debido a la propagación de oleaje lejano “swell” proveniente de ambos hemisferios. Durante la temporada de invierno el oleaje dominante proviene del Pacífico Norte, mientras que durante el Verano el oleaje de mayor energía proviene del Pacífico Sur, coincidiendo con la temporada de invierno austral (Young, 1999).

Como se mencionó en el capítulo 5, se identificaron tres zonas en el área de estudio, Norte, Intermedia y Sur. La Zona Norte (ZN) abarca los nodos Campo López, Isla Todos Santos, El Retiro, Santo Tomás y Eréndira. La Zona Intermedia (ZI) abarca Colonet, Isla San Martín y El Rosario, mientras que la Zona Sur (ZS), Isla Guadalupe e Isla Cedros (Figura 4).

Los nodos presentes en la ZN se encuentran a una distancia aproximada de entre 2 y 11 km de la costa y profundidades entre 30 a 600 m. Esta serie de nodos se localizan aledaños a las ciudades de Rosarito y Ensenada. Los parámetros estadísticos de oleaje muestran H_s mínimos de 1 m y máximos de 1.8m, así como T_p mínimos de 13.5 s y máximos de 14.9 s.

En la ZI los nodos se encuentran a una distancia aproximada entre 2 y 13 km de la costa y profundidades entre 12 y 86 m. Los parámetros estadísticos de oleaje revelan H_s mínimos de 1 m y máximos de 1.9 m, mientras que T_p mínimos de 13.1 s y máximos de 14.7s. Por último, en la ZS se encuentran dos nodos aledaños a las islas más grandes de Baja California en la costa del Pacífico. Ambos nodos se encuentran en la parte externa de las islas, en la sección suroeste. Mientras que Isla Cedros mantiene una población de pescadores estable

de alrededor de 3000 personas (INEGI, 2019) Isla Guadalupe presenta un pequeña población de pescadores y un campamento militar, además es un área natural protegida (CONANP, 2016). En Isla Guadalupe se obtuvieron H_s mínimos de 1.7 m y máximos de 2.4 m, así como T_p mínimos de 11.9 s y máximos de 14.7 s. En Isla Cedros se obtuvieron H_s mínimos de 1.4 m y máximos de 2 m, mientras que T_p mínimos de 13 s y máximos de 14.7 s.

Para calcular los estimados de potencial energético disponible en los sitios se sugirió usar el parámetro T_e , a partir de la relación $T_e = \alpha \cdot T_p$. Donde α es un coeficiente con valor entre 0.8 a 0.85 para el oleaje presente en los sitios. Se considero utilizar el valor inferior para evitar sobrestimaciones.

Los sitios propuestos presentaron distintos valores anuales de potencial energético, por un lado, los más energéticos fueron Isla Guadalupe e Isla Cedros con 26.7 kW/m y 19.4 kW/m (Tabla IV), ubicados en la ZS de la costa occidental de Baja California. Esto a pesar de estar localizados en latitudes más bajas entre 2° y 3° que el resto de los sitios (Tabla I). Sin embargo, la ubicación de los nodos en la parte externa de la isla es en aguas profundas donde están expuestos a mayor energía del oleaje (Folley, 2009).

Los sitios menos energéticos en escala temporal anual fueron Campo López y Colonet con 10.6 kW/m y 12.5 kW/m (Tabla IV), esto debido a estar ubicados en zonas protegidas lo cual genera disipación de la energía del oleaje.

De acuerdo a los valores obtenidos por el análisis de COV, SV y MV los sitios presentan resultados de variabilidad muy similares y estos corresponden a los valores sugeridos por (Cornett, 2008) para el área estudiada. Sin embargo, cabe resaltar que el valor de COV mínimo lo obtuvo el nodo Isla de Cedros con 0.76 y el máximo El Retiro con 0.96. Un valor cercano a 1 muestra que la desviación estándar es igual al promedio, mientras que un valor de 2 la desviación estándar es el doble del promedio (Cornett,2008). Para SV el mínimo lo obtuvo Campo López con 0.58 y el máximo Colonet con 0.95. Así mismo el valor mínimo de MV lo obtuvo el nodo Campo López con 0.76 y el máximo Colonet con 1.12.

9.2. Dispositivos CEO

Se evaluó el desempeño de 8 dispositivos Convertidores de energía del Oleaje, los valores que se obtuvieron sugieren los mejores dispositivos para aprovechar el oleaje en la costa occidental de Baja California. Los resultados muestran que el sitio con mayor energía extraída durante todo el año por aparatos CEO fue el sitio de Isla Guadalupe (Tabla VI). Los dispositivos que presentaron un mayor P_{ext} fueron *Oyster* con 346.3 kW, *Wavestar* 202 kW y *Pontoon* 164 kW (Tabla VI). Este resultado demuestra que a pesar de que solo una porción de la energía del oleaje disponible es captada, dependiendo el dispositivo, los estimados fueron mayores en los sitios con un oleaje más energético con niveles considerables a lo largo del año que en el caso de este trabajo fueron los sitios correspondientes a Isla de Cedros e Isla Guadalupe. Otro factor importante a considerar es que los aparatos aquí presentados trabajan con distintos principios de funcionamiento y poseen características muy diferentes. Es deseable y esperado que los dispositivos tengan mejores desempeños en sitios con flujo energético mayor y constante. Como se observó, los valores resultantes son muy diferentes entre dispositivos, ciertas características como las dimensiones y arreglos: en el caso de captadores puntuales individuales como *Sea-based* y *Ceto*, determinaron un P_{ext} menor donde obtuvieron estimados entre 0.69 a 2.22 kW y 2.63 a 10.9 kW respectivamente, entre el sitio menos energético Campo López y el más energético Isla Guadalupe. En contraste dispositivos como *Pontoon* ó *Wavestar* diseñados como arreglos de varios captadores puntuales, presentaron estimados alrededor de entre 42.9 kW a 164 kW y 47.2 a 202 kW respectivamente, entre el sitio menos energético Campo López y más energético Isla Guadalupe. Cabe mencionar que el análisis que se llevó a cabo a partir de las matrices de eficiencia de los dispositivos fue para sistemas unitarios, es decir no se tomó en cuenta el potencial que presentan sistemas relativamente pequeños en comparación con los demás sistemas analizados como él *Sea-based*, pero que tienen opciones de arreglos de múltiples dispositivos que ofrecen una opción

interesante. Sin embargo, se puede inferir que si un solo dispositivo *Sea-based* produce 2kW en promedio al año, una granja de 20 dispositivos produciría alrededor de 40 kW, valor suficiente para contener con dispositivos mayores en estructura y tal vez más costosos. Esto se verá más a detalle en la sección de criterios de costos. No obstante, para la potencial instalación de una granja de dispositivos CEO merece investigación más profunda al respecto por la forma en la que el oleaje interactúa con los diversos dispositivos en el agua y por consecuencia puede afectar la climatología del oleaje en los sitios aledaños (Venugopal, Nimalidinne, & Vögler, 2017).

Los casos particulares de sistemas de múltiples arreglos pero que se modelaron y consideraron como unitarios fueron los dispositivos *Pontoon* y *Wavestar*. Para el primero se consideró un dispositivo con 10 boyas mientras que para el segundo un sistema de 20 boyas unidas por brazos a un puente de acuerdo a los resultados de la modelación de (Babarit et al., 2012) para obtener las matrices de eficiencia de cada CEO.

El dispositivo *Oyster* fue el que obtuvo valores de energía extraíble más altos para todos los sitios, por lo que por lo menos en potencia extraíble es el que puede capturar la mayor cantidad de energía de las olas, sin embargo debe tenerse en cuenta las limitaciones del dispositivo ya que es un dispositivo principalmente para uso en aguas cercanas a la costa ~20m. Dado que los sitios más cercanos a la costa que se evaluaron fueron Colonet y Campo López los estimados más cercanos a los valores reales son estos, mientras que en los sitios más energéticos y lejos de la costa como Isla Guadalupe y Cedros los valores pueden estar sobreestimados. A pesar de esto los resultados del presente trabajo son comparables a los realizados por Babarit et al., 2012 donde el dispositivo *Oyster* obtuvo valores máximos de energía anual en 4 de 5 sitios Europeos.

La dirección del oleaje es un parámetro importante en el estudio de este fenómeno, pero en el caso de la determinación de la energía disponible en un sitio no es precisado. Sin embargo, puede resultar relevante en el caso de la interacción del oleaje con ciertos tipos de dispositivos, en especial cuando se trata de un arreglo de múltiples dispositivos. En este trabajo se analizaron 8 dispositivos

de los cuales 5 entran en la categoría captador puntual es decir que poseen simetría axial por lo que pueden capturar energía de las olas en todas direcciones.

Los 3 dispositivos restantes se tratan de dos paletas oscilantes (*Oyster* y *Langlee*) y un atenuador (*OE buoy*). En el caso del *Oyster* debido a que está configurado para trabajar en aguas cercanas a la costa ~20 m. el oleaje incidente al entrar en aguas someras se va ordenado paralelamente a la costa por lo que impactaría la paleta colocada de frente para obtener el mejor desempeño posible de conversión de energía. Es así que los sistemas *Langlee* y *OE buoy* al estar diseñados para aguas profundas y debido a sus principios de captura, requieren un estudio más detallado acerca del espectro direccional presente en los sitios para así conocer la mejor configuración para su óptimo desempeño.

Un factor muy importante en la captura de energía de las olas es el PTO ó Toma de Fuerza. El PTO es el mecanismo de conversión a energía eléctrica, puede ser directa ó lineal, ó puede tener distintas etapas dependiendo el tipo de PTO(Drew, Plummer, & Sahinkaya, 2009; López, Andreu, Ceballos, Alegría, & Kortabarria, 2013). La forma tradicional de convertir energía eléctrica es a través de un generador rotatorio, accionado por una turbina hidráulica o de aire, sin embargo, esto es un reto ya que las oscilaciones de las olas son lentas (~1 Hz) y es necesario primero convertirlas a revoluciones rápidas, por lo que se utilizan sistemas mecánicos neumáticos ó hidráulicos. Los aparatos aquí analizados presentan PTO, del tipo lineal e hidráulico y neumático. Existe debate sobre cual PTO es el mejor para dispositivos CEO, sin embargo el uso de los generadores lineales actualmente es el que está teniendo más aceptación debido a que se simplifica la conversión y posee menos partes móviles (Pecher, 2012). Aún después de lograr convertir la energía de las olas a energía eléctrica, se tiene que convertir la señal eléctrica de salida, a una adecuada para inyectarla a la red, a excepción del sistema *Sea-based* que presenta esta subestación en mar, la mayoría de los dispositivos presentan esta parte del sistema en costa(López et al., 2013).

9.2.1. Parámetros de desempeño

Los parámetros de desempeño que se evaluaron fueron el Factor de capacidad (F_c) el Ancho ó Amplitud de captura (A_c) y la razón de ancho de captura (η_1). De acuerdo a (Babarit, 2015; Price et al., 2009; Rusu & Onea, 2016) estos parámetros son de gran ayuda para determinar el nivel de desempeño de los dispositivos. Respecto al Factor de capacidad los dispositivos que consiguieron un mayor desempeño fueron *Oyster*, seguido de *WaveStar*, *Seabased*, *Pontoon* y *Wavebob*. En contraste los dispositivos con estimados inferiores de F_c fueron *Langlee*, *OE buoy* y *Ceto*. Los dos primeros son aparatos que mejoran su eficiencia de captura si se encuentran con una orientación de mayor incidencia a la dirección de las olas, en este estudio no se incluyeron datos sobre dirección del oleaje, por lo que se sugieren estudios posteriores.

Todos los dispositivos obtuvieron el mejor F_c en los sitios Isla Guadalupe e Isla Cedros, con valores máximos de 40%(*Oyster*) y mínimos de 3%(*Langlee*). El parámetro Ancho de captura (A_c), comprende la relación entre la energía esperada de un dispositivo y la energía presente en el sitio, y está dada en los metros de frente de ola que son capturados y absorbidos por el dispositivo. Los dispositivos con valores más altos fueron *Oyster* y *Wavestar* con 9.5 y 5.2 metros en los sitios Isla San Martín y El Rosario. Los valores más bajos fueron por parte de los dispositivos *Sea-based* y *Ceto* con 0.07 y 0.29 m, en los sitios Eréndira e Isla San Martín. Cabe mencionar que los valores de A_c fueron muy similares en los sitios con energía disponible moderada, a excepción de los sitios más energéticos como Isla Guadalupe y Cedros donde los valores de A_c fueron muy inferiores en todos los dispositivos, contrario a lo que sucedió con la potencia extraída estimada y el Factor de capacidad. Esto corresponde con los resultados de (Rusu & Onea, 2016) que obtuvieron valores de ancho de captura altos en sitios con energía moderada. Así mismo los sitios considerados más energéticos fueron los que obtuvieron valores inferiores de A_c . De acuerdo a (Rusu & Onea, 2016) esto significa que esa porción pequeña de frente de ola fue capturada más

eficientemente por algún dispositivo al arrojar un valor mayor de potencial energético extraíble(output).

Por último, la razón de ancho de captura (η_1) es un parámetro de desempeño hidrodinámico que consiste en la relación entre el A_c previamente calculado y la dimensión de la estructura del CEO (normalmente ancho) B . El resultado presenta el porcentaje de energía disponible que fluye y es convertida en energía extraíble por el aparato (Babarit, 2015). Para tener una guía de acuerdo a que dimensión del aparato considerar para B se apoyó en la definición por (Pecher, 2012) "El ancho activo es el ancho de todos los componentes presentes activamente en el proceso de absorción primaria de la energía de las olas". Para los dispositivos del tipo absorbedores puntuales oscilatorios se utilizó además la ecuación para determinar el diámetro característico del flotante de acuerdo a (Babarit, 2015; Falnes, 2007) donde D es el diámetro del flotante. Además, se consideraron el número de múltiples absorbedores en los dispositivos con arreglos como *Wavestar* y *Pontoon*.

$$B = \sqrt{\frac{4D}{\pi}}$$

Los dispositivos que presentaron valores máximos fueron *Wavebob* y *Oyster* con estimados máximos de 59% y 36% respectivamente. El dispositivo *Sea-based* fue el que obtuvo menos alrededor de 3%.

9.2.2. Indicadores de costos

Los resultados de potencia extraíble por dispositivo para distintas condiciones presentes en sitios de interés son en sí el primer paso e indicadores de posibles costos para estimar la viabilidad de un proyecto con energía de las olas. El criterio más importante para determinar la viabilidad de cualquier proyecto de aprovechamiento de energía del oleaje es el costo por kWh. Sin embargo, determinar el costo por kWh en las diferentes etapas de desarrollo o a nivel prototipo, se dificulta por lo que se sugieren indicadores de costo como criterios (Babarit et al., 2012).

Los indicadores de costos sugeridos por (Babarit et al., 2012) son: energía promedio absorbida equivalente a la potencia extraída, energía absorbida por masa característica y energía absorbida por superficie característica.

Los resultados de la potencia extraída por cada CEO se discutieron al inicio de la sección 9.2. Para el caso de la energía extraída de acuerdo a la masa característica de los aparatos los resultados más relevantes los obtuvieron los dispositivos *Wavestar* y *Oyster* con valores máximos de 1.1 y 0.8 kWh/kg para el sitio Isla Guadalupe y mínimos de 0.26 y 0.22 kWh/kg para el sitio Campo López respectivamente. El dispositivo con estimados inferiores fue *Wavebob* con máximo en Isla Guadalupe con 0.17 kWh/kg y mínimo en Campo López con 0.04 kWh/kg. Es evidente que se necesitan estudios posteriores para determinar una propia estimación de costos, sin embargo estos índices pueden ser de ayuda para estimar costos en etapas más avanzadas de proyectos con energía de las olas. En promedio el dispositivo *Wavestar* produce cerca de 0.5 MWh/tonelada, mientras que el que menor capacidad presenta es el dispositivo *Wavebob* con 0.08MWh/tonelada.

En el caso de la energía extraída de acuerdo a la superficie sumergida los valores más relevantes fueron los siguientes. El dispositivo *Oyster* fue el que obtuvo valores máximos en el sitio Isla Guadalupe con 1.5 MWh/m² y mínimo en Campo López con 0.41 MWh/m². El dispositivo *OE buoy* obtuvo valor máximo con 0.14 MWh/m² mientras el mínimo fue de 0.03 MWh/m². En promedio el dispositivo *Oyster* produce 0.74 MWh/m² esto quiere decir que es el que mayor energía produce por metro cuadrado de área sumergida, como se mencionó, el dispositivo *Oyster* por su principio de funcionamiento permanece casi en su totalidad sumergido, esto explicaría porque presenta valores mayores en este índice. En contraste el *OE buoy* posee una estructura rectangular parcialmente sumergida y su principio de funcionamiento es el de una OWC flotante.

Debido a que el rubro de los sistemas captadores de energía de las olas, es relativamente nuevo hablando desde el punto de vista económico, la mayoría de los sistemas propuestos se encuentran en fases de investigación y desarrollo, se puede hacer uso de estrategias y métodos ya probados en otras industrias como

es en la construcción naval. En la construcción naval se pueden hacer estimaciones de costos de acuerdo a la masa total del casco de un navío, en el caso de los CEO la mayor parte de la masa total son los anclajes y lastres de concreto, por lo cual se consideró además el índice de área superficial sumergida de acuerdo a (Babarit et al., 2012)

A pesar de que se encuentra en una fase temprana comercialmente, en comparación con otras formas de energías alternas como la solar o eólica, el futuro luce prometedor para la energía proveniente de las olas, debido a que los costos han decaído desde 1980's y la tendencia es que sigan disminuyendo conforme se desarrolle y distribuya más tecnología (Kim et al., 2012).

9.2.3. Demanda energética en Baja California

Baja California presenta oportunidades para la planeación e impulso de energías alternas. Como en el país, la operación de los sistemas eléctricos es responsabilidad de un monopolio estatal como lo es la Comisión Federal de Electricidad (CFE), pero en el ámbito de generación eléctrica Baja California tiene situadas plantas energéticas privadas y públicas que explotan las fuentes de energía primaria de su territorio. El estado no está interconectado a la red eléctrica del país, por lo que es autónomo en cuanto a los niveles de oferta y demanda del servicio, no así al esquema de precios utilizados a nivel nacional para el consumo de electricidad (Muñoz-Melendez, Díaz-Gonzalez, Campbell-Ramírez, & Quintero-Nuñez, 2012).

Hasta 2012 en Baja California la capacidad instalada de generación es de poco más de 3,000 MW, considerando servicio tanto público como privado. La infraestructura eléctrica de Baja California se compone de 9 centrales generadoras y 28 unidades de generación de acuerdo a CFE. Respecto a la tecnología empleada la de mayor relevancia es la geotermia con 720 MW instalados, ciclo combinado de CFE con 496 MW instalados, productores independientes con 498MW instalados, termoeléctrica convencional con 320 MW instalados y 10 MW del parque eólico La Rumorosa (SENER, 2017). Cabe mencionar que Baja

California es la entidad generadora de energía geotérmica más importante del país esto le confiere cierta relevancia respecto al uso de energías alternas (Muñoz-Melendez et al., 2012). Se presenta una tabla comparativa entre la energía producida en México y Baja California en los Anexos.

Respecto al consumo eléctrico total en el estado durante el periodo 1990-2010 se muestra un crecimiento con una tasa anual de 4.9%. Las principales demandas energéticas provienen de las ciudades de Mexicali y Tijuana. De acuerdo a la Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029 (SENER, 2015), la península de Baja California junto con la sección Noroeste (Sonora-Sinaloa) presentan los mayores crecimientos nacionales de demanda energética para ese periodo (entre 4.3%-5.6% anual). Ante tales pronósticos es importante trabajar en sinergia entre entidades públicas, privadas e Instituciones de Investigación para aprovechar recursos energéticos renovables presentes en la entidad como ya se ha hecho con la geotermia o el viento.

9.2.4. Impacto ambiental

Conforme ha aumentado el interés en los dispositivos CEO, es importante conocer las consecuencias de su aplicación. En este sentido autores como (Jones et al., 2018) han estudiado a el potencial impacto que pueden causar en mayor o menor medida los dispositivos CEO a partir de modelos numéricos (Delft3D-FLOW-SNL-SWAN) y así determinar alteraciones en la dinámica del fondo marino y transporte de sedimentos.

Cualquier estructura en el océano, especialmente en aguas costeras, impactará la hidrodinámica del sitio. La interacción de la energía de las olas con la línea de costa crea corrientes locales responsables de erosionar o depositar sedimento en la línea de costa. Es por esto que si el oleaje incidente intercepta a un arreglo de múltiples CEO es muy probable que cause fuertes corrientes locales en sitios aledaños a los dispositivos. El potencial impacto afectaría la dinámica costera del sitio (Chowdhury, Nader, Fleming, & Winship, 2015).

El impacto visual también es un tema recurrente sobre todo en los dispositivos cercanos a la costa. Aun así, hay dispositivos como *Ceto* ú *Oyster* que tienen la ventaja de encontrarse sumergidos por lo cual el impacto visual es mínimo.

Así mismo en un escenario de instalación y operación se deben tener en cuenta las principales rutas marítimas de navíos y de especies migratorias. Con la ventaja de que en el caso de las grandes rutas marítimas comerciales naturalmente evitan condiciones climáticas extremas, donde existen altos niveles energéticos de oleaje. Pero no todos son inconvenientes, también se han identificado ventajas en el uso de estos aparatos. Pueden ser utilizados como protección costera por lo que aparte de capturar la energía de las olas y convertirla en energía útil pueden proteger puertos ó sitios costeros de las olas.

Las estructuras fijadas y sumergidas de estos dispositivos además pueden ser aprovechadas por la vida marina, al ser utilizados como santuarios ó refugios, algo que ha sido documentado previamente con estructuras situadas en el océano. Así mismo debido a que la mayoría de los sistemas CEO que trabajan con fluido, suelen utilizar agua dulce para operar, el potencial daño ambiental por derramamiento de fluido de trabajo en el océano es nulo.

10. Conclusión

En esta tesis se evaluaron 8 convertidores de energía del oleaje mediante un análisis del tipo Benchmarking utilizando una proyección del régimen de oleaje en 10 sitios de la costa oeste de Baja California. Los resultados señalaron al dispositivo *Oyster* como el CEO con mayor potencia extraíble anual en todos los sitios. Por lo tanto, es el dispositivo que mejor se desempeña con las condiciones de oleaje de los sitios de estudio. Esto fue corroborado con los parámetros de desempeño, en los que obtuvo los valores más altos en factor de capacidad (F_c) Ancho de captura (A_c) y razón de ancho de captura (η_1). Así mismo obtuvo mayor rendimiento en los indicadores de costos a excepción de la relación entre producción energética anual por masa donde *WaveStar* presentó mayor desempeño. Dispositivos con una cantidad moderada de P_{ext} anual fueron: *Wavestar* y *Pontoon*. Mientras que los dispositivos con P_{ext} anual moderada-baja fueron: *Waveboob*, *OE buoy* y *Langlee*. Finalmente, los dispositivos que obtuvieron niveles bajos de P_{ext} anual fueron: *Ceto* y *Seabased*.

El sitio que obtuvo un mayor potencial energético anual (P_e) fue Isla Guadalupe con un estimado de 26.7 kW/m. Los sitios con un nivel moderado de P_e anual fueron Isla Cedros 19.4 kW/m, Isla San Martín 16.1 kW/m y El Rosario 16 kW/m. Mientras que los sitios con un P_e anual bajo fueron El Retiro, Santo Tomás, Isla Todos Santos, Eréndira, Colonet y Campo López con valores entre 14.2 y 8.5 kW/m. La variabilidad del oleaje en los sitios fue muy similar, sin embargo el sitio con un valor COV mayor fue El Retiro 0.96 y el sitio con menor COV fue Isla Cedros 0.76. A pesar de que la mayoría de los sitios evaluados obtuvieron niveles moderados-bajos de energía disponible, se identificaron sitios como la parte externa de Isla Guadalupe e Isla Cedros con valores considerables para la extracción de energía del oleaje. Por tanto, la energía undimotriz se presenta como una valiosa oportunidad para cubrir la demanda energética de comunidades aisladas de la entidad.

Fuentes de Financiamiento

Este trabajo se realizó en parte con recursos provenientes del proyecto SEP-Procesos de intercambio de propiedades en dos sistemas lagunares de Baja California, ref:11157". Cuerpo Académico de "Oceanografía operacional" ref: UABC-CA-249.

Referencias

- Alonso, R., Solari, S., & Teixeira, L. (2015). Wave energy resource assessment in Uruguay. *Energy*, 93, 683–696. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.114>
- Arija, S. H. (2011). Diseño eléctrico de una boya para energía olamotriz.
- Babarit, A. (2015). A database of capture width ratio of wave energy converters. *Renewable Energy*, 80, 610–628. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.049>
- Babarit, A., Hals, J., Muliawan, M. J., Kurniawan, A., Moan, T., & Krokstad, J. (2012). Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. *Renewable Energy*, 41, 44–63. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.002>
- Bozzi, S., Miquel, A. M., Antonini, A., Passoni, G., & Archetti, R. (2013). Modeling of a point absorber for energy conversion in Italian seas. *Energies*, 6(6), 3033–3051. <https://doi.org/10.3390/en6063033>
- Calero Pérez, R., Carta-González, J., & Padrón Hernández, J. (2007). Energía del oleaje. In *Energía* (pp. 513–552). Ayuntamiento de Palmas de Gran Canaria. Retrieved from <https://www.yumpu.com/es/comunidad.eduambiental.org>
- Cameron, L., Doherty, R., Henry, A., Doherty, K., Hoff, J. Van, Kaye, D., ... Whittaker, T. (2010). Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter.
- Carnegie Clean Energy. (2019). Carnegie Clean Energy. Retrieved from <https://www.carnegiece.com>
- Castillo Villagra, R., Segovia Barros, V., Díaz Flores, G., & Araya Medina, C. (2018). Potencial undimotriz de la región de Tarapacá (Chile) como foco de

- fomento productivo. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 26(1), 72–85.
<https://doi.org/10.4067/s0718-33052018000100072>
- Chowdhury, S. De, Nader, J., Fleming, A., & Winship, B. (2015). A review of hydrodynamic investigations into arrays of ocean wave energy converters, (August).
- CONANP. (2016). Fichas de evaluación ecológica de áreas naturales protegidas del noroeste de México.
- Cornett, A. M. (2008). A Global Wave Energy Resource Assessment. *The International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE)*, (July 2008), 1–9.
- Díaz Velilla, J. P. (2015). *Sistemas de energías renovables*. (Paraninfo, Ed.).
- Downing, L. (2013). Wavebob Shuts Down After Failing to Raise Funds, Find Partner. Retrieved August 20, 2010, from
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2013-04-03/wavebob-shuts-down-after-failing-to-raise-funds-find-partner>
- Drew, B., Plummer, A. R., & Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223(8), 887–902.
<https://doi.org/10.1243/09576509JPE782>
- European Marine Center. (2017). Wave developers. Retrieved from
<http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/>
- Falcão, A. F. d. O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 899–918.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>
- Falcao, A., & Henriques, J. C. C. (2016). Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines : A review. *Renewable Energy*, (85), 1391–1424.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.086>
- Falnes, J. (2007). A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, 20(4), 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.09.001>
- Folley, M., & Whittaker, T. J. T. (2009). Analysis of the nearshore wave energy resource. *Renewable Energy*, 34(7), 1709–1715.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.003>

- González-Ramírez, X., Hernández-Robles, I. A., & Barrios-Piña, H. (2017). Potencial energético undimotriz en nodos costeros de México Parte 1: Estimación energética. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(6), 5–22.
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-01>
- Henry, A., Doherty, K., & Whittaker, T. (2010). Advances in the Design of the Oyster Wave Energy Converter.
- INEGI. (2019). Población Baja California. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx>
- Jones, C., Chang, G., Raghukumar, K., McWilliams, S., Dallman, A., & Roberts, J. (2018). Spatial Environmental Assessment Tool (SEAT): A Modeling Tool to Evaluate Potential Environmental Risks Associated with Wave Energy Converter Deployments. *Energies*, 11(8), 2036.
<https://doi.org/10.3390/en11082036>
- Jonsson, L., & Krell, M. (2011). *Evaluating the Potential of Seabased's Wave Power Technology in New Zealand*. Uppsala Universitet.
- Kim, C. K., Toft, J. E., Papenfus, M., Verutes, G., Guerry, A. D., Ruckelshaus, M. H., ... Polasky, S. (2012). Catching the Right Wave: Evaluating Wave Energy Resources and Potential Compatibility with Existing Marine and Coastal Uses. *PLoS ONE*, 7(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047598>
- Kimoulakis, N. M., Kladas, A., & Tegopoulos, J. A. (2008). Power Generation Optimization From Sea Waves by Using a Permanent Magnet Linear Generator Drive, (July). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.914854>
- Kramer, M. B. (2011). Performance Evaluation of the Wavestar Prototype. In A. S. Bahaj (Ed.), *9th EWTEC 2011: Proceedings of the 9th European Wave and Tidal Conference*. Southampton, UK, 5th-9th September 2011: University of Southampton.
- Langlee Wave Power AS. (2013). Langlee: Innovation for a better solution.
- Lavelle, J., & Kofoed, J. P. (2011). *Power Production Analysis of the OE Buoy WEC for the CORES Project*. Aalborg.
- Leyva-Ollivier, M. E. (2016). *Evaluación del potencial energético del oleaje y su posible conversión en energía eléctrica utilizando dispositivos comerciales*

existentes en Playas de Rosarito, Baja California. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.

- López, I., Andreu, J., Ceballos, S., Alegría, I. M. De, & Kortabarría, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 413–434.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.009>
- Makai Ocean Engineering. (n.d.). Retrieved November 18, 2018, from <https://www.makai.com>
- Mann, L. D. (2011). Application of Ocean Observations & Analysis: The CETO Wave Energy Project. In A. Schiller & G. B. Brassington (Eds.), *Operational Oceanography in the 21st Century* (pp. 721–730). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0332-2>
- Masuda, Y., & McCormick, M. E. (1986). Experiences in pneumatic wave energy conversion in Japan, in: M.E. McCormick, Y.C. Kim (Eds.). In M. E. McCormick & Y. C. Kim (Eds.), *Utilization of Ocean Waves - Waves to Energy Conversion* (pp. 1–33). New York: Amer Soc Civil Eng.
- Mouwen, F. (2008). Presentation on Wavebob to Engineers Ireland. Consultado en Octubre 2018.
- Muliawan, M. J., Gao, Z., & Moan, T. (2013). Application of the Contour Line Method for Estimating Extreme Responses in the Mooring Lines of a Two-Body Floating Wave Energy Converter, (August).
<https://doi.org/10.1115/1.4023796>
- Muñoz-Melendez, G., Díaz-Gonzalez, E., Campbell-Ramírez, H. E., & Quintero-Núñez, M. (2012). *Baja California : Perfil Energético 2010-2020. Propuesta y Análisis de Indicadores Energéticos para el Desarrollo de Prospectivas Estatales.* Mexicali Baja California.
- Ocean Energy Ireland. (2017). Design – Build – Test: The Ocean Energy Philosophy. Retrieved from <http://www.oceanenergy.ie/oe-technology1/development>
- Padilla-Hernandez, R. (1989). *Potencia y direccion del oleaje en la costa noroeste de la Peninsula de Baja California y su aprovechamiento.* Tesis de

- Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California.
- Pecher, A, Kofoed, J. P., Espedal, J., & Hagberg, S. (2010). Results of an Experimental Study of the Langlee Wave Energy Converter.
- Pecher, Arthur. (2012). *Performance Evaluation of Wave Energy Converters*. Aalborg University.
- Perelló-Reina, D., Navarro-Olache, L.F., Hernández-Walls, R., García-Nava, H. (2017). *Potencial Energético Del Oleaje Para La Generación Eléctrica En La Península De Baja California*.
- Pontoon Power. (2012). Pontoon Power Converter; harvesting wave energy on a large scale. Retrieved from <https://www.pontoon.no/index.html>
- Posso, F. (2002). Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. Parte dos: Sistema energético basado en energías alternativas. *Geoenseñanza*, (7 (1-2)), 54-73.
- Price, A. A. E., Dent, C. J., & Wallace, A. R. (2009). On the capture width of wave energy converters. *Applied Ocean Research*, 31(4), 251–259.
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2010.04.001>
- Rafiee, A., & Fiévez, J. (2015). Numerical Prediction of Extreme Loads on the CETO Wave Energy Converter.
- Renzi, E., Doherty, K., Henry, A., & Dias, F. (2014). How does Oyster work? the simple interpretation of Oyster mathematics. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 47(November 2017), 124–131.
<https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2014.03.007>
- Renzi, Emiliano, Gallagher, S., Wei, Y., & Abadie, T. (2017). Analytical and computational modelling for wave energy systems: the example of oscillating wave surge converters, (July). <https://doi.org/10.1007/s10409-017-0683-6>
- Robertson, B. (2010). Ocean Wave Energy Generation on the West Coast of Vancouver Island and the Queen Charlotte Islands. *Guelph Engineering Journal*, (3), 9–18.
- Romanovsky, V. (1968). *Física del oceano*. Barcelona: Ediciones Martínez Roca.
- Rusu, L., & Onea, F. (2015). Assessment of the performances of various wave

- energy converters along the European continental coasts. *Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.099>
- Rusu, L., & Onea, F. (2016). The performance of some state-of-the-art wave energy converters in locations with the worldwide highest wave power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (May), 0–1.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.123>
- Salar, D. (2018). *Miniature Wave Energy Converter Miniature Wave Energy Converter (WEC)*.
- Salter, S. H. (1974). Wave power. *Nature*, 249, 720. Retrieved from
<http://dx.doi.org/10.1038/249720a0>
- SeaBased AB. (2019). SeaBased wave energy.
- SENER. (2015). *Prospectiva del sector eléctrico 2015-2029*.
- SENER. (2017). *Prospectivas de energías renovables 2017-2031*.
- Sheng, W., Lewis, A., & Alcorn, R. (2011). NUMERICAL STUDIES ON HYDRODYNAMICS OF A FLOATING OSCILLATING. In *Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean Offshore and Arctic Engineering OMAE2011* (pp. 1–8). Rotterdam, The Netherlands.
- Silva, D., Rusu, E., & Soares, C. G. (2013). Evaluation of various technologies for wave energy conversion in the portuguese nearshore. *Energies*, 6(3), 1344–1364. <https://doi.org/10.3390/en6031344>
- Spendolini, M. J. (1994). *The Benchmarking Book*. Amacom. Retrieved from
<https://books.google.com.mx/books?id=6HV4QgAACAAJ>
- Tolman, H. L. (2002). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. *NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note*, 1–139.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- United Nations. (2017). Ocean Conference:our oceans. Retrieved September 20, 2005, from <https://oceanconference.un.org>
- Vannucchi, V., & Cappietti, L. (2016). Wave Energy Assessment and Performance Estimation of State of the Art Wave Energy Converters in Italian Hotspots. *Sustainability*, 8(12), 1300. <https://doi.org/10.3390/su8121300>
- Venugopal, V., Nimalidinne, R., & Vögler, A. (2017). Numerical modelling of wave

energy resources and assessment of wave energy extraction by large scale wave farms. *Ocean and Coastal Management*, 147, 37–48.

<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.03.012>

Waters, R. (2008). *Energy from Ocean Waves Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter*. Uppsala.

Wave Star A/S. (2013). *Wavestar prototype at Roshage, Performance data for ForskVE project no 2009-1-10305 phase 1 & 2*.

Wave Star A/S. (2019). The Wavestar Story. Retrieved from <http://wavestarenergy.com/projects>

Weber, J., Mouwen, F., Parish, A., & Robertson, D. (2014). Wavebob – Research & Development Network and Tools in the Context of Systems Engineering, (October).

Young, I. R. (1999). Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate. *International Journal of Climatology*, 19(9), 931–950.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199907\)19:9<931::AID-JOC412>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199907)19:9<931::AID-JOC412>3.0.CO;2-O)

Anexos

Producción energética anual por área sumergida [MWh/m²]

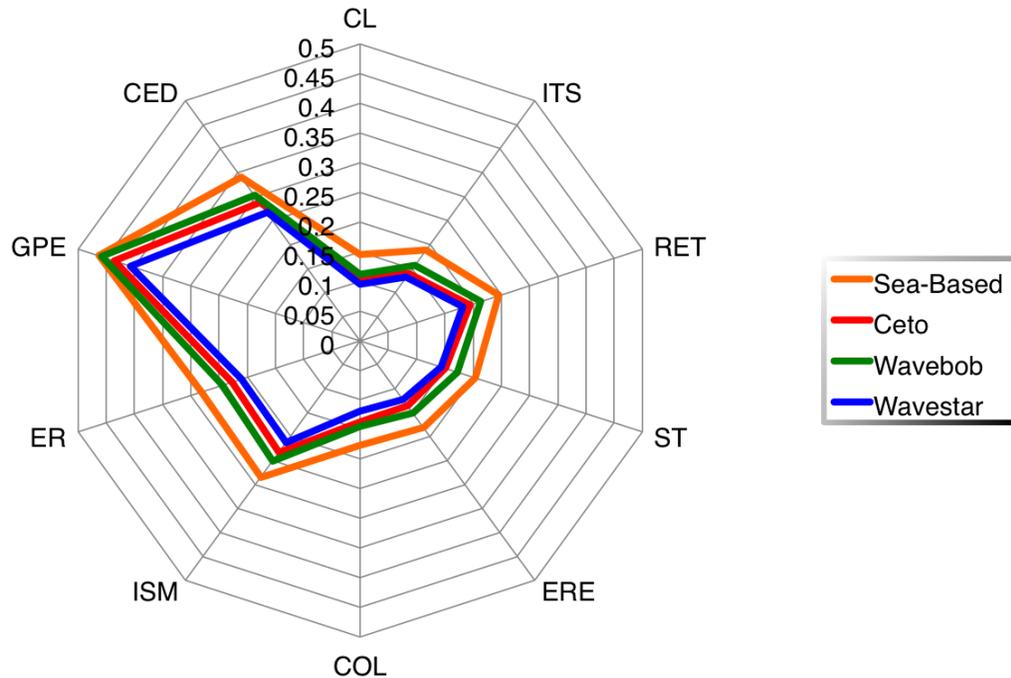


Figura 45. Resultados del parámetro indicador de costo de la relación que existe entre la producción energética anual (MWh) por área sumergida del aparato dada en m². La escala de colores representa los dispositivos Sea-Based, Ceto, Wavebob y Wavestar, mientras que en los ejes se muestran los valores obtenidos para cada sitio. Los valores estimados van de 0.1 a 0.47 MWh/kg.

Producción energética anual por área sumergida [MWh/m²]

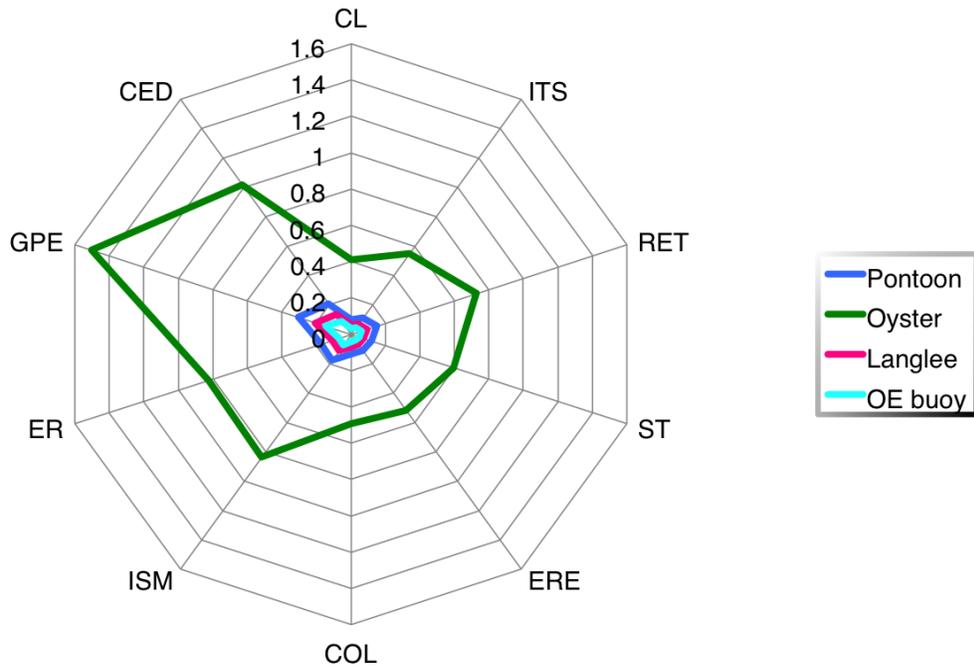


Figura 46. Resultados del parámetro indicador de costo de la relación que existe entre la producción energética anual (MWh) por área sumergida del aparato dada en m². La escala de colores representa los dispositivos *Pontoon*, *Oyster*, *Langlee* y *OE buoy*, mientras que en los ejes se muestran los valores obtenidos para cada sitio. Los valores estimados van de 0.1 a 1.5 MWh/kg.

Fuentes	Baja California	Total País	Porcentaje
Vapor	788.5	43,325.4	1.8
Ciclo combinado	2,953.9	31,823.7	9.3
Turbogas	238.1	2,795.5	8.5
Geotermoeléctrica	5,176.1	7,055.8	73.4
Otros	-	74,863.8	-
Total	9,156.6	159,864.2	5.7

Tabla VII. Diversos tipos de generación de energía eléctrica en Baja California y en México (GWh). Fuente: CFE (s/a), Estadísticas por entidad federativa (sector eléctrico nacional) en (Muñoz-Melendez et al., 2012).