

Potencial energético por mareas oceánicas

Energy potential from ocean tides

Arturo Cabrera-Prieto, Xiomara González-Ramírez

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, México.
a.cabreraprieto@ugto.mx, x.gonzalez@ugto.mx.

Resumen

El potencial energético por mareas oceánicas o energía mareomotriz es aquella que se obtiene con el movimiento de las mareas. Dado que es una fuente renovable de energía, es una opción para aprovechar este recurso al máximo debido a la creciente demanda energética que se presenta en el mundo actual. Por tanto, este trabajo propone la consulta del potencial energético por mareas oceánicas en algunos puntos de México, considerando la zona costera del Océano Pacífico y el Atlántico. El objetivo es revisar los parámetros de cálculo y definir cuál de los puntos seleccionados presentan mayor potencial energético. Este recurso natural presenta un gran potencial energético que puede ser transformado en energía eléctrica y por ende obtener grandes beneficios a la sociedad.

Palabras clave: Fuente renovable de energía; Energía mareomotriz; Potencial energético.

1. Introducción

Aun cuando los océanos y mares cubren cerca del 70 % de la superficie del planeta, la construcción de centrales mareomotrices para el aprovechamiento rentable de esta energía limpia está restringida a diversas condiciones naturales. No obstante, el potencial energético de tales tecnologías es importante. Pues las zonas costeras suelen experimentar dos mareas altas y dos mareas bajas por día. Países como Francia, Corea del Sur, Canadá y Reino Unido cuentan con importantes centrales mareomotrices de gran capacidad energética. Así como diversos proyectos de expansión a futuro. Otros, como Rusia, China, India, Suiza, España, Portugal, Australia, Nueva Zelanda, Estados Unidos, Chile y México, cuentan con importantes zonas costeras idóneas para su implementación (Universidad Americana de Europa, 2020).

En México, el potencial de la energía mareomotriz se estima que sea igual o mayor a la energía solar o eólica. Estimándose un potencial de hasta 7 gigavatios (GW). El Golfo de California es una de las regiones más estudiadas dentro del territorio mexicano para su implementación. Debido a que en él se presentan mareas de hasta 6 metros de amplitud. Así como una topografía marina idónea. La baja pendiente y la profundidad del lecho marino aumentan la fricción del agua con la roca, incrementando la fuerza de las corrientes (Universidad Americana de Europa, 2020).

El potencial energético por mareas oceánicas se obtiene de la diferencia de la marea alta y la marea baja, el fenómeno principal que genera las mareas y corrientes oceánicas tiene su origen con la posición relativa con el sol, la luna y la tierra, esto provoca un movimiento de oscilación distinto en el mar, en base a esos datos se puede obtener el potencial energético de marea. La necesidad de generar más energía es un motivo para incentivar la investigación del potencial energético por las mareas, ya que la gran ventaja que presentan las mareas, como fuente energética, es que se caracteriza por ser periódicas, se puede decir que predecibles. Por tanto, existe una gran necesidad de entender el comportamiento de dicho recurso, ya que la energía mareomotriz es una fuente renovable de energía de la cual se puede extraer energía potencial.

En este trabajo se presenta un estudio de potencial energético por mareas oceánicas en 4 puntos de la zona costera mexicana, donde se incluyen las vertientes del Océano Pacífico y Océano Atlántico, a partir de la altura de las mareas y de otros parámetros se determina su potencial energético.

2. Marco Teórico

Las fuentes energéticas basadas en la utilización del sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal o animal, entre otras, se caracterizan por no utilizar combustibles fósiles, como sucede con las energías convencionales, sino con recursos capaces de renovarse ilimitadamente tal como se presenta con las mareas.

Las mareas son cambios periódicos en el nivel del mar causados por los efectos gravitacionales del sol y la luna en conjunción con la rotación de la tierra. Como principio básico, cuando la luna o el sol están sobre una porción específica del océano, el agua es atraída desde otra parte debido a la fuerza gravitacional y, por lo tanto, el nivel del mar sube en esa región y baja en el resto. Cuando la luna o el sol están justo debajo de los pies, la situación es similar. Por lo tanto, hay mareas altas cuando la luna está sobre o debajo de los pies. Dado que la distancia entre la luna y la tierra es mucho menor que entre el sol y la tierra, el efecto gravitacional de la luna es mucho más significativo que el del sol sobre la tierra, a pesar de su tremendo contraste en masa. Por lo tanto, generalmente hay dos mareas altas y dos mareas bajas por día, debido a la rotación de la tierra (Stanford University, 2019).

La diferencia entre los niveles de agua más altos y bajos en medio día se denomina *amplitud semidiurna*. Esta amplitud varía en un ciclo de dos semanas, como se muestra en la Figura 1, alrededor de la luna llena y la luna nueva, el sol, la luna y la tierra forman una línea recta, y por lo tanto el efecto gravitacional del sol aumentará la amplitud de la marea al máximo, esto se llama *marea viva*, cuando las mareas se oponen se llama *marea muerta*. Cuando el ángulo entre la luna y el sol vistos desde la tierra es de 90° , la presencia del sol reduce la diferencia del nivel de la marea de modo que la amplitud de la marea alcanza el mínimo (Stanford University, 2019).

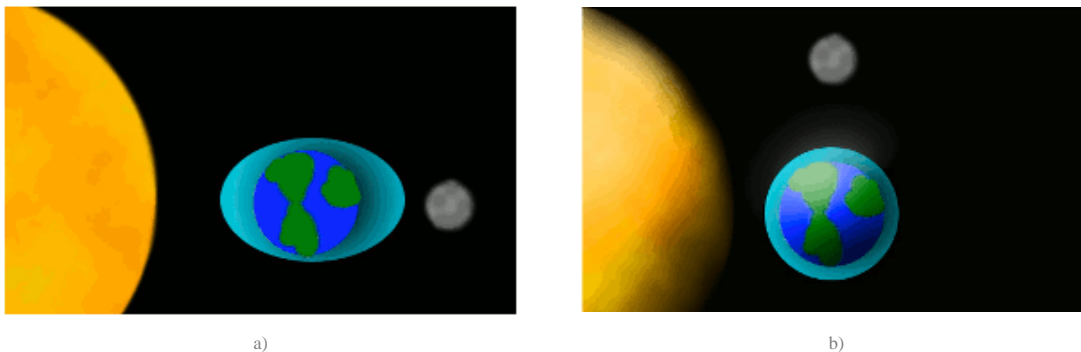


Figura 1. Relación de las mareas entre el Sol, la Luna y la Tierra. a) Marea viva; b) Marea muerta (Stanford University, 2019).

2.1. Clasificación de las mareas.

Dado que hay tantas variables que influyen en la formación de mareas, es comprensible que no todos los lugares de la tierra experimenten exactamente las mismas condiciones de marea. Existen tres clasificaciones principales de mareas, se clasifican según la cantidad y la altura relativa de los ciclos de marea por día (Webb, 2023).

2.1.1. Marea Diurna

Una marea diurna (*Diurnal*) consiste en una sola marea alta (*High Tide*) y una marea baja (*Low Tide*) por día, Figura 2. El término “*Diurno*” se refiere a una situación que ocurre a diario, por lo que una situación en la que solo hay un ciclo de marea completo por día se considera una *marea diurna*. Las mareas diurnas son comunes en el Golfo de México, a lo largo de la costa oeste de Alaska y en partes del sudeste asiático (Webb, 2023).

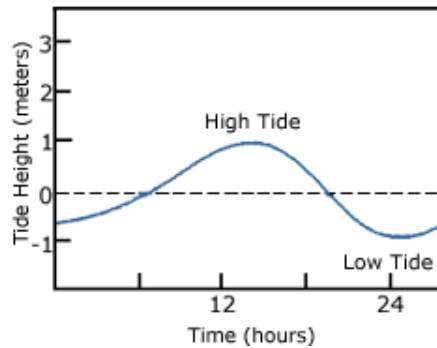


Figura 2. Marea Diurna (Webb, 2023).

2.1.2 Marea Semidiurna.

Una marea semidiurna presenta dos mareas altas (*High Tides*) y dos mareas bajas (*Low Tides*) cada día, con ambas mareas altas y bajas de aproximadamente la misma altura, Figura 3. “*Semidiurna*” significa “medio día”; un ciclo de marea dura medio día, por lo tanto, hay dos ciclos completos por día. Las mareas semidiurnas son comunes a lo largo de las costas orientales de América del Norte y Australia, la costa occidental de África y la mayor parte de Europa (Webb, 2023).

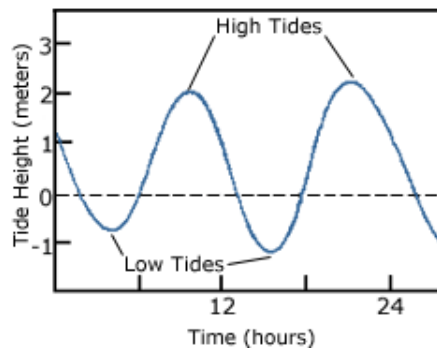


Figura 3. Marea Semidiurna (Webb, 2023).

2.1.3. Mareas Mixtas.

Las mareas mixtas (o mareas semidiurnas mixtas) tienen dos mareas altas (*High Tides*) y dos mareas bajas (*Low Tides*) por día, pero la altura de cada marea es diferente; las dos mareas altas tienen alturas diferentes, al igual que las dos mareas bajas, Figura 4. Las diferencias de altura pueden ser el resultado de la circulación antitrófica, el ángulo de la luna o cualquiera de las otras variables. Las mareas semidiurnas mixtas se encuentran a lo largo de la costa del Pacífico de América del Norte (Webb, 2023).

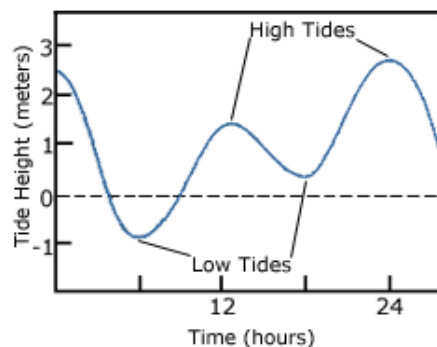


Figura 4. Mareas mixtas (Webb, 2023).

2.2. Potencial energético mareomotriz.

Se basa en aprovechar la marea, el ascenso y descenso del agua del mar, producido por la acción gravitatoria del Sol y la Luna (Factorenergia, 2021). Las presas se utilizan para aprovechar la energía potencial de las mareas. Las presas son diques controlados para permitir la entrada y salida de agua en puntos específicos del ciclo de las mareas. Durante la marea alta, el agua puede entrar en la presa a través de compuertas equipadas con turbinas. Durante la marea baja, el agua puede salir de la presa.

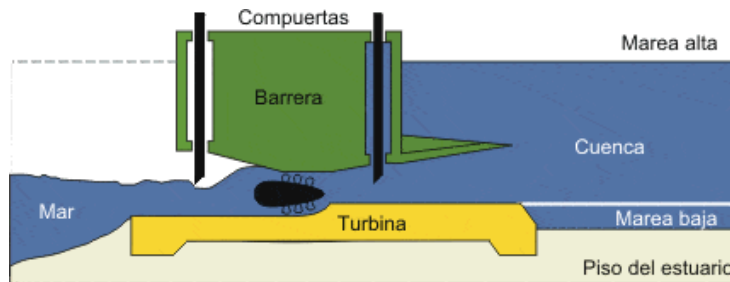


Figura 5. Generación de energía mediante presas de marea (AREA TECNOLOGIA, 2014).

La diferencia de altura entre las mareas *Alta* y *Baja* se conoce como *amplitud de mareas* y la diferencia de potencial debida a la amplitud de mareas da como resultado la energía potencial de marea aprovechada, ya que el movimiento del agua hace que las turbinas se muevan (Stanford University, 2019). La energía potencial (Joule) de marea aprovechada se da mediante la siguiente ecuación:

$$Energía = \frac{\rho g A h^2}{2} \quad (1)$$

Donde:

ρ : Densidad del agua del mar ($\rho = 1027 \text{ kg/m}^3$).

g : Aceleración de la gravedad ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$).

A : Área de la sección transversal de la turbina (m^2).

h : Rango de marea (m).

2.3. Energía Mareomotriz.

Se conoce como energía mareomotriz a la que se obtiene del aprovechamiento de las mareas. A través de plantas mareomotrices se aprovecha de distintos modos el agua del mar para generar, mediante un sistema de alternadores, una carga eléctrica que pueda ser aprovechada de numerosas formas. De las fuentes de energía renovable oceánicas, la generada por la corriente marina puede considerarse la más madura y cercana a la comercialización. Allí donde se dé una diferencia mínima de cinco metros entre la marea *Alta* y la *Baja*, es posible instalar una turbina para captar esa energía y convertirla en electricidad (Enciclopedia Concepto, 2021).



Figura 6. Planta mareomotriz (Enciclopedia Concepto, 2021).

3. Mareas Oceánicas en México

Se analizará la zona más conveniente para generar energía eléctrica, ya que la zona costera mexicana presenta una gran extensión tanto en el Océano Pacífico como en el Atlántico. Al analizar los datos de las mareas, se calculará cuanta energía eléctrica se podría obtener en ciertos puntos de la zona costera mexicana. A continuación, en la Figura 7, se puede observar que zonas cuentan con un mayor potencial mareomotriz a nivel mundial, en base (López González, Hiriart Le Bert, & Silva Casarín, 2010) se seleccionaron las partes con mayor rango de mareas, lo cual las hace un excelente lugar para la obtención de la energía mareomotriz.



Figura 7. Lugares con importantes rangos de marea (López González, Hiriart Le Bert, & Silva Casarín, 2010).

En la Figura 7, se observa que la parte más importante de México en rango de mareas se encuentra en el norte del Océano Pacífico, por tanto, se tomará un análisis general abarcando la parte norte y sur del Océano Pacífico. El Golfo de California es una de las regiones más estudiadas dentro del territorio mexicano para su implementación (Universidad Americana de Europa, 2020).

3.1. Puntos de estudio.

Los puntos de estudio que se eligieron para analizar su potencial energético son los siguientes:

Punto 1: Costa del Pacífico, Baja California Sur, San Carlos.

Punto 2: Golfo de California, Baja California, San Felipe.

Punto 3: Golfo de California, Sonora, Golfo de Santa Clara.

Punto 4: Golfo de México, Campeche, Campeche.

La selección de estos puntos se hace con el objetivo de abarcar las zonas en donde se pueda obtener el mayor potencial de este recurso. La base de datos de la altura de las mareas es obtenida de la plataforma Tabla de mareas y solunares de México 2024 (TABLA DE MAREAS, 2024).

3.2. Base de datos.

Se obtuvieron la altura de marea *Baja*, *Media*, *Alta* y *Muy Alta*. Se analizaron 496 datos de altura de marea para obtener el promedio de las diferentes categorías y así obtener el potencial mareomotriz de las diferentes zonas costeras de la República Mexicana, al analizar dichas zonas se podrá encontrar la que tenga mayor potencial energético para este recurso natural.

Para predecir las mareas se calculan a partir de la serie temporal de datos obtenida por los mareógrafos en años anteriores. Esta serie de datos es ajustada por el método de mínimos cuadrados utilizando el algoritmo de Foreman. Cuanto mayor sea la serie de datos obtenida mayor será la precisión de la predicción, ya que se cuenta con un número mayor de constantes armónicas. Sin embargo, la instalación y toma de datos con mareógrafos son procesos complejos, y dado que normalmente existen pocas variaciones de mareas para localizaciones relativamente cercanas, es posible predecir la marea de los puertos secundarios (aquellos para los que no se dispone de constantes armónicas) efectuando unas sencillas

correcciones en las horas y alturas de los puertos de referencia (para los cuales se han obtenido una larga serie fiable de datos del nivel del mar) (Foreman, 2004).

Los responsables del emplazamiento y toma de datos de los mareógrafos son los gobiernos de cada país, publicando en el anuario de mareas las últimas predicciones realizadas y en ocasiones también las últimas constantes armónicas obtenidas (TABLA DE MAREAS, 2024).

Los promedios de mareas, mencionadas anteriormente, se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 1. Promedio de altura de mareas (m) del Punto 1.

COSTA DEL PACIFICO: Baja California Sur, San Carlos.			
Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
0.3	0.7	1.35	1.9

Tabla 3. Promedio de altura de mareas (m) del Punto 3.

GOLFO DE CALIFORNIA: Sonora, Golfo de Santa Clara.			
Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
0.5	1.1	3.8	4.6

Tabla 2. Promedio de altura de mareas (m) del Punto 2.

GOLFO DE CALIFORNIA: Baja California, San Felipe.			
Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
0.4	1	3.5	4.2

Tabla 4. Promedio de altura de mareas del Punto 4.

GOLFO DE MÉXICO: Campeche, Campeche.			
Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
0.3	0.4	0.5	0.6

4. Resultados

4.1. Potencial energético

Para determinar el potencial energético de las mareas es necesario tomar en cuenta la Ec. (1). Se consideró una Turbina de eje horizontal con 3 palas y 5 m de diámetro, la sección transversal de la turbina es de 9.81m^2 , de al cumplir las condiciones para este tipo de mareas, debido a que el movimiento de las masas de agua en las mareas mueve las turbinas y es un alternador el que genera la energía eléctrica, al ser mareas sencillas ha sido probada en varios países, por ejemplo, en Estados Unidos generando alrededor de 70 MW/h (Jodar Hernández, 2020).



Figura 8. Turbina de flujo libre (Jodar Hernández, 2020).

A continuación, se muestran las gráficas del potencial de marea obtenido. Al aplicar la Ec. (1), para el cálculo del potencial energético llamada *energía potencial de marea*, y tomando en cuenta el promedio de las alturas, la sección transversal de una turbina, la fuerza de gravedad y la densidad del agua del mar. La energía potencial (Joule), se ilustra

en las siguientes gráficas como energía eléctrica. Para obtener el potencial en energía eléctrica se realizó la conversión de *Joule (Watt-s)* a *Watt-hora*.

En la Figura 9, se observa el potencial de marea obtenido aplicando la Ec. (1), y tomando los valores promedio de las alturas de marea registradas en la Tabla 1. Se obtiene como resultado un potencial de 1.23 Wh para el promedio de altura de marea *Baja*, 6.73 Wh para nivel de marea *Media*, 25.01 Wh para nivel de marea *Alta*, y 49.55 Wh para el nivel de marea *Muy Alta*.

En la Figura 10, se observa el potencial de marea obtenido aplicado la Ec. (1), y tomando los valores promedio de las alturas de marea registradas en la Tabla 2, obteniendo como resultado un potencial de 2.2 Wh para el promedio de altura de marea *Baja*, 13.73 Wh para nivel de marea *Media*, 168.15 Wh para nivel de marea *Alta*, y 242.14 Wh para el nivel de marea *Muy Alta*.

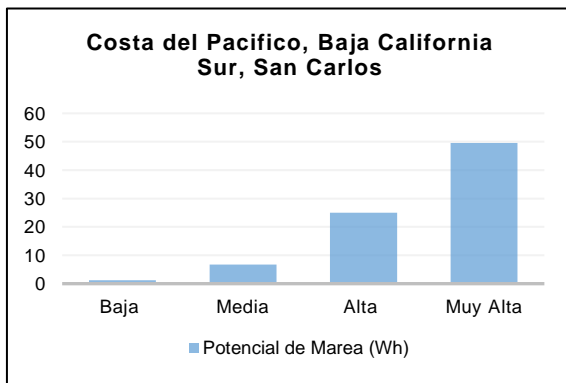


Figura 9. Potencial energético de marea Punto 1 (San Carlos).

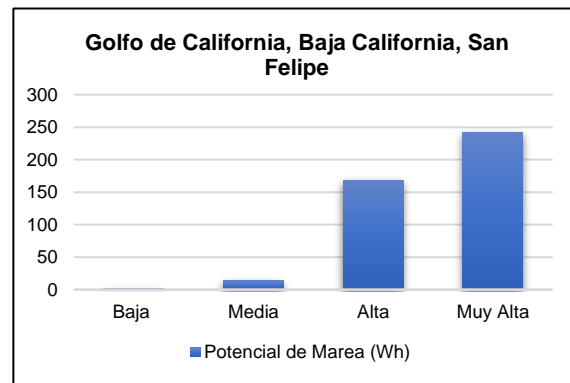


Figura 10. Potencial energético de marea Punto 2 (San Felipe).

En la Figura 11, se observa el potencial de marea obtenido aplicando la Ec. (1), y tomando los valores promedio de las alturas de marea registradas en la Tabla 3, obteniendo como resultado un potencial de 3.43 Wh para el promedio de altura de marea *Baja*, 16.60 Wh para nivel de marea *Media*, 198.22 Wh para nivel de marea *Alta*, y 290.42 Wh para el nivel de marea *Muy Alta*.

En la Figura 12, se observa el potencial de marea obtenido aplicando la Ec. (1), y tomando los valores promedio de las alturas de marea registradas en la Tabla 4, obteniendo como resultado un potencial de 1.23 Wh para el promedio de altura de marea *Baja*, 2.20 Wh para nivel de marea *Media*, 3.43 Wh para nivel de marea *Alta*, y 4.94 Wh para el nivel de marea *Muy Alta*.

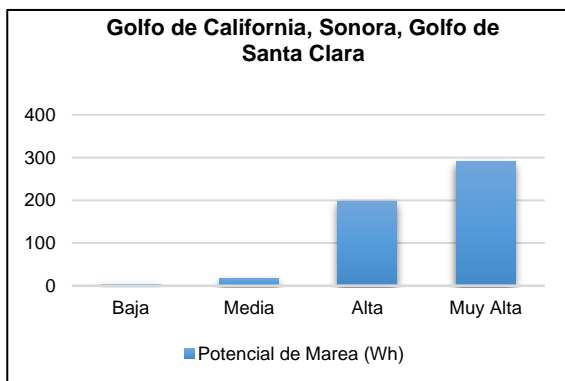


Figura 11. Potencial energético de marea Punto 3 (Golfo de Santa Clara).

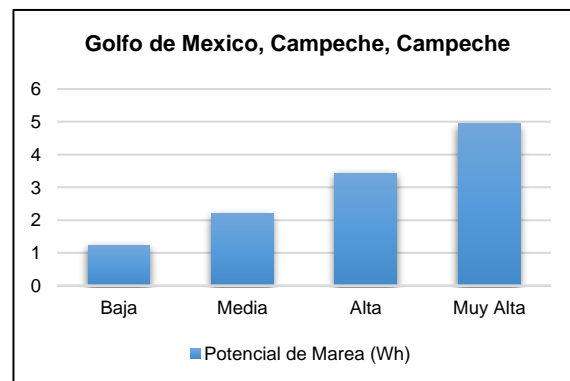


Figura 12. Potencial energético de marea Punto 4 (Campeche).

4.2. Comparación de resultados entre los distintos tipos de mareas

A partir de los resultados obtenidos con el promedio de la altura de las mareas, se observa cual es la zona de los puntos seleccionados con mayor potencial energético.

Tabla 5. Potencial energético de marea Baja (Wh).

Nivel de marea Baja			
San Carlos	San Felipe	Golfo de Santa Clara	Campeche
1.23	2.2	3.43	1.23

Tabla 7. Potencial energético de marea Alta (Wh).

Nivel de marea Alta			
San Carlos	San Felipe	Golfo de Santa Clara	Campeche
25.01	168.15	198.22	3.43

Tabla 6. Potencial energético de marea Media (Wh).

Nivel de marea Media			
San Carlos	San Felipe	Golfo de Santa Clara	Campeche
6.73	13.73	16.6	2.2

Tabla 8. Potencial energético de marea Muy Alta (Wh).

Nivel de Marea muy Alta			
San Carlos	San Felipe	Golfo de Santa Clara	Campeche
49.55	242.14	290.42	4.94

En base a lo anterior se deduce que la zona de los puntos seleccionados donde se podría obtener un mayor potencial energético de las mareas es en el Punto 3 (Golfo de California, Sonora, Golfo de Santa Clara), obteniendo mareas con un promedio de altura en mareas *Muy Alta* de 4.6 m. El lugar con un menor aprovechamiento de este recurso sería el Punto 4 (Golfo de México, Campeche, Campeche), ya que las mareas no alcanzan ni siquiera 1 m de altura, aun estando en el nivel *Muy Alta* de marea, por consiguiente, en este punto se obtiene el menor potencial energético de las mareas. En la Figura 13, a manera de una mejor comprensión del potencial energético de marea *Muy Alta*, se grafican los 4 puntos, visualizándose que el Punto 3 es el que presenta mayor potencial.

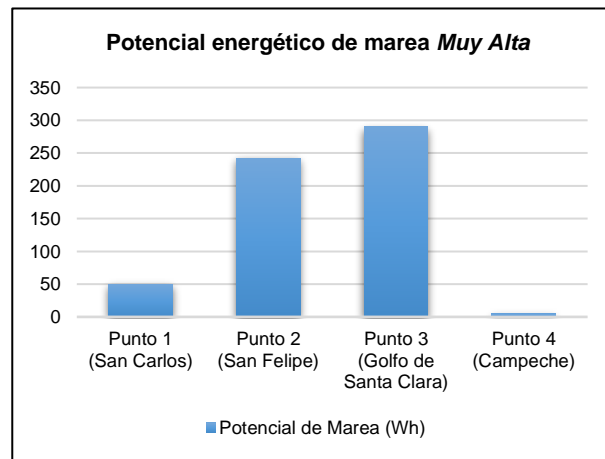


Figura 13. Potencial energético de marea muy alta para los 4 puntos.

5. Conclusiones

Existen varias formas de obtener energía renovable a través del mar, al analizar la altura de las mareas no siempre tienen el mismo valor, ya que dependen de la distancia de la luna con la tierra y el sol, lo que lo hace muy importante para el cálculo de su potencial energético. En base a los resultados obtenidos del promedio de altura de marea *Baja*, *Media*, *Alta*, y *Muy Alta*, se obtiene que los niveles de marea más altos se encuentran en el Golfo de California, el nivel de marea promedio se encuentra en el Océano Pacífico, y las mareas con altura más baja se encuentran en el Golfo de México, por tanto, se deduce que el Golfo de California es la mejor opción para implementar una planta generadora de energía mareomotriz. El potencial energético de marea en el nivel de marea *Muy Alta* es de 290.42 Wh, ubicado en el Punto 3

(Golfo de California, Sonora, Golfo de Santa Clara), confirmando lo mencionado anteriormente, de igual manera el menor potencial energético es de 1.23 Wh localizado en el Punto 4 (Golfo de México, Campeche, Campeche), finalmente se deduce que el Golfo de California cuenta con la altura de mareas más altas, de toda la zona costera mexicana con lo cual se obtiene un mayor potencial energético.

Referencias

- AREA TECNOLOGIA. (2014). *Energía Mareomotriz*. Recuperado el 25 de Julio de 2024, de <https://www.areatecnologia.com/electricidad/energia-mareomotriz.html>
- Enciclopedia Concepto. (15 de Julio de 2021). *Energía mareomotriz*. (E. Coluccio Leskow, Productor) Recuperado el 24 de Julio de 2024, de Enciclopedia Concepto: <https://concepto.de/energia-mareomotriz/>
- Factorenergia. (24 de Febrero de 2021). *La energía mareomotriz: la gran desconocida*. Recuperado el 2024 de Julio de 2024, de <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energia-mareomotriz/>
- Foreman, M. G. (Septiembre de 2004). *MANUAL FOR TIDAL HEIGHTS ANALYSIS AND PREDICTION*. Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Department of Fisheries and Oceans, Canadá. Recuperado el 24 de Julio de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/240106566_Manual_for_Tidal_Heights_Analysis_and_Prediction
- Jodar Hernández, P. (10 de Junio de 2020). *Diseño de una turbina para una central de energía mareomotriz*. Universidad de Cataluña, Barcelona. Recuperado el 2024 de Julio de 2024, de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/328658>
- López González, J., Hiriart Le Bert, G., & Silva Casarín, R. (Abril - Junio de 2010). Cuantificación de energía de una planta mareomotriz. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, XI(2), 233-245. doi:<https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2010.11n2.019>
- Stanford University. (10 de Diciembre de 2019). *Sun, Moon, Oceans: The Potential of Ocean Tidal Energy*. (N. Peterson, Productor) Recuperado el 24 de Julio de 2024, de Stanford University site: <http://large.stanford.edu/courses/2018/ph240/peterson2/>
- TABLA DE MAREAS. (2024). Recuperado el 24 de Julio de 2024, de <https://tablademareas.com/mx/>
- Universidad Americana de Europa. (14 de Enero de 2020). *Potencial de la energía mareomotriz*. Recuperado el 25 de Julio de 2024, de UNADE site: <https://unade.edu.mx/energia-mareomotriz/>
- Webb, P. (2023). *Introduction to Oceanography*. Roger Williams University. Recuperado el 24 de Julio de 2024, de <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/>