

DOI: 10.24850/j-tyca-13-05-08

Artículos

Estimación teórica de la potencia disponible en las fuentes de energía marina en México

Theoretical assessment of the available power from the marine energy sources in Mexico

Erick Iván García-Santiago¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5146-6922>

Edgar Mendoza², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1991-4721>

Rodolfo Silva³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0064-9558>

¹Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, egarcias@iingen.unam.mx

²Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, emendozab@iingen.unam.mx

³Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, rsilvac@iingen.unam.mx



Autor para correspondencia: Edgar Mendoza,
emendozab@iingen.unam.mx

Resumen

La necesidad de incorporar a las energías renovables en la matriz energética de las naciones del mundo es un valor entendido que no requiere más justificación porque, más allá de metas locales o compromisos internacionales, de ello depende la sostenibilidad de la humanidad. En México, sin embargo, la contribución de las fuentes de energía limpias y renovables al sistema eléctrico nacional se mantiene todavía con cierto rezago. Uno de los principales retos a vencer es la provisión de información útil para la toma de decisiones y que permita dar certeza a los potenciales inversionistas. En el caso de las fuentes de energía marinas, esto se traduce, en primera instancia, en ofrecer datos que permitan vislumbrar la capacidad eléctrica que se podría instalar y con ello estimar la viabilidad del negocio. En ese sentido, este trabajo contribuye a la caracterización de la potencia disponible en las diferentes fuentes aprovechables del océano, a la vez que se hacen recomendaciones de sitios donde ahondar en estudios y análisis. Se hizo una revisión bibliográfica de la potencia en las fuentes: corrientes, térmica y salino para el Caribe mexicano. Se encontró que existen sitios de aprovechamiento geográficamente viables y con recurso disponible adecuado para cubrir una parte considerable de la demanda eléctrica de

la península de Yucatán y la isla Cozumel. Sitios clave son la parte sur de la isla y el canal de Cozumel para corrientes; la parte norte de Quintana Roo para oleaje; la parte central del mismo estado para OTEC, y la bahía de Chetumal para gradiente salino. En cuanto a energía undimotriz, componente central de este trabajo, se evaluó de manera teórica todo el litoral nacional, encontrando siete sitios recomendables para analizar a mayor profundidad. Luego de una estimación gruesa y conservadora, se halló que esta fuente de energía podría contribuir, en el corto o mediano plazos con al menos un 0.2 % de la capacidad instalada nacional.

Palabras clave: energías marinas, potencia disponible de energía del océano, capacidad instalada de fuentes renovables, sitios de aprovechamiento marinos.

Abstract

While the need to use clean, renewable energies in electricity generation is universally understood, Mexico is lagging behind other countries regarding the contribution these sources have to the production of energy nationally. The first hurdle to overcome is providing accurate information for decision-makers and potential investors. In the case of renewable marine energy, this means generating data on the possible installed electrical capacities of the various sources at sites across the country. From this, it is possible to estimate the economic viability of implementing renewable energy projects at specific locations. This work, therefore, aims

to characterize the available power from diverse energy sources around the coasts of Mexico and to make recommendations of sites where the energy potential warrants further analysis. A literature review of the power available from marine currents, waves, and thermal and saline gradient sources was performed for the Mexican Caribbean. Several sites were found to be geographically viable; there is sufficient potential energy available to meet at least part of the energy demands of the Yucatan Peninsula and Cozumel Island. Key sites are to the south of Cozumel Island and in the Cozumel Channel for energy harvested from ocean currents. In the northern part of Quintana Roo, sites offer great potential for wave energy, while the central part of the state could be suitable for energy generation from thermal gradients. In Chetumal Bay, there is potential for saline gradient electricity. Wave energy potential was evaluated for the entire Mexican coast, and seven locations are recommended for further investigation. A conservative gross estimation has shown that wave energy could contribute up to 0.2 % of the national demand in the short or mid-term, with a relatively small investment and a low environmental impact.

Keywords: Marine energy, available ocean power, renewable sources installed capacity, marine plants deployment locations.

Recibido: 09/10/2018

Aceptado: 12/08/2021



Introducción

El crecimiento acelerado de la población mundial, así como la rápida evolución y expansión de la tecnología, han originado un incremento de la demanda eléctrica a nivel global. México no es la excepción, baste señalar que en 1980 el consumo nacional estimado fue de 186.5 TWh y en 2018 aumentó a 318.2 TWh, es decir, hubo un incremento de 71 % en 38 años (Cenace, 2019). Por ello, la generación de energía a precios asequibles y con responsabilidad ambiental se ha vuelto un tema de participación de todos los sectores de la población (gobiernos, industria, educación e investigación). Por otro lado, es innegable que el consumo de hidrocarburos ha impactado de manera negativa en el medio ambiente global y aun cuando se cuenta con reservas probadas para varias décadas, estos combustibles son finitos y no renovables en escala de tiempo humana. Ante este escenario, la sociedad debe buscar fuentes alternativas de energía de carácter renovable y limpias (o lo menos contaminantes posible), que permitan alcanzar una seguridad energética parecida a la que ofrecen los combustibles fósiles (Awerbuch, 2006).

En México se tiene una participación todavía menor de las energías renovables en el sistema eléctrico nacional. Las fuentes que principalmente aportan son hidroeléctrica, eólica y solar fotovoltaica. De acuerdo con el Centro Nacional de Control de Energía de México (Cenace, 2019), al término de 2018, las energías renovables, sin contar la hidroeléctrica, aportaron sólo el 10.9 % de la capacidad efectiva instalada nacional y estaban distribuidas como se muestra en la Figura 1.

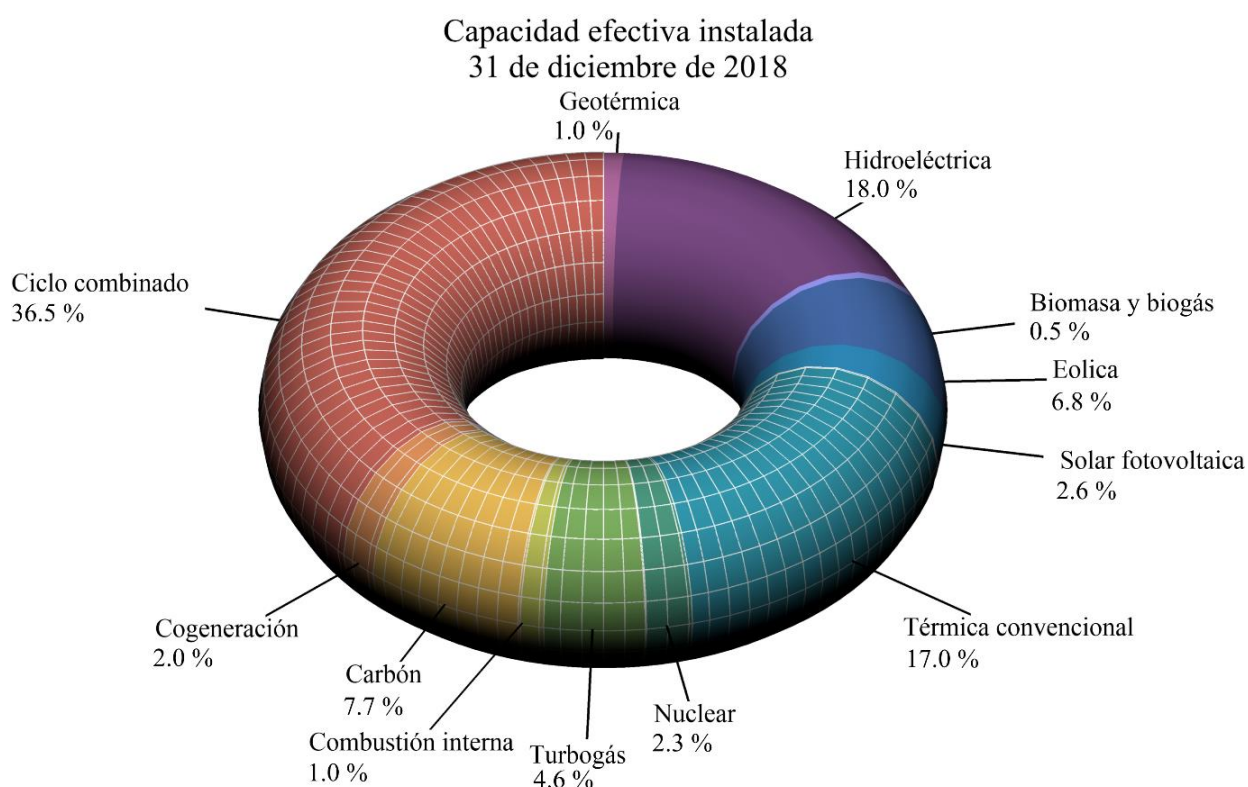


Figura 1. Capacidad efectiva instalada en México al 31 de diciembre de 2018 por tipo de tecnología.

La gran ausente en la Figura 1 es, en definitiva, la energía contenida en los océanos. De manera simplificada, el océano cuenta con cinco fuentes de energía con posibilidad de ser aprovechadas: oleaje, mareas, corrientes, gradiente térmico y gradiente salino. Por su parte, en la literatura especializada (p. ej., Melikoglu, 2018; OES, 2020) existe una gran variedad de dispositivos y tecnologías capaces de capturar la energía de dichas fuentes, y convertirlas en electricidad u otro tipo de energía (OES, 2018). Como ejemplo, considérese solo la energía undimotriz, para la cual existen más de 200 patentes de dispositivos alrededor del mundo. Sin embargo, estas tecnologías han sido desarrolladas para regiones con niveles altos de potencia disponible (lo cual es natural, dada la búsqueda de generar electricidad a precios competitivos) y, como es de suponer, distintos a los que se pueden encontrar en México. Es decir, los desarrollos y tecnologías que han alcanzado los niveles más altos de madurez tecnológica han sido concebidos para latitudes que corresponden con zonas templadas, donde el oleaje, las corrientes y las amplitudes de marea son más energéticos que en la zona tropical. Por el contrario, las altas temperaturas del agua marina en la zona tropical hacen que fuentes como el gradiente térmico o el gradiente salino presenten mayores potencias disponibles en dicha región. Estas tecnologías, sin embargo, se encuentran en etapas tempranas de desarrollo. Es evidente, ante esta situación, que los retos que debe superar México para incluir las energías marinas en el sistema eléctrico nacional están relacionados tanto con la

caracterización de las fuentes en sus aguas territoriales como con un desarrollo tecnológico específico (Felix *et al.*, 2019).

El presente trabajo busca contribuir al primero de los retos planteados, al sentar las bases para la caracterización de las fuentes marinas de energía en el mar mexicano. Para ello, se entenderá por caracterización comprender la física, dinámica, distribución y disponibilidad de las fuentes, lo cual debería impactar en el diseño específico de las tecnologías para su aprovechamiento. En tal sentido, este artículo presenta una metodología teórica (en la siguiente sección) y los resultados obtenidos (en la tercera sección) de una evaluación de la potencia disponible para cada una de las fuentes aprovechables en el océano, con la intención de incentivar tanto el desarrollo de evaluaciones en menor escala y mayor detalle, como despertar el interés de inversionistas y tomadores de decisiones en la incorporación de las energías marinas en el sistema eléctrico nacional.

Métodos



Una de las mayores dificultades en la caracterización de las fuentes de energía marina es la escasez de series temporales en calidad y cantidad de datos suficientes registrados en los sitios costeros. Una alternativa es el uso de bases de datos globales obtenidas sintéticamente a partir de reanálisis. En el caso del presente trabajo, únicamente se tuvo disponible información de oleaje, por lo que sólo para la energía undimotriz se evaluó todo el país y para el resto de las fuentes el estudio se limitó a la península de Yucatán. Como es de suponer, éste no es el primer esfuerzo que se realiza sobre estimar la potencia disponible en los mares mexicanos. Existen, al menos, dos trabajos previos, mismos que se han utilizado como base y complemento del presente. El primero de ellos es el de Pérez (2013), quien utilizó datos de reanálisis de oleaje de 1948 a 2007 para estimar la potencia disponible en todo el litoral mexicano. El segundo trabajo es el de Bárcenas-Graniel (2014), quien estimó la potencia disponible en el caribe mexicano. En las siguientes secciones se describen los métodos que estos autores —y muchos otros a nivel mundial— han utilizado para la estimación de la potencia de cada fuente de energía del océano. En todo caso, las metodologías de estimación teórica de la potencia disponible parten de las mismas ecuaciones, las cuales se describen a continuación.

Potencia disponible en el oleaje



Asumiendo la teoría lineal de ondas de pequeña amplitud, en aguas profundas, la potencia teórica disponible en el oleaje, P_O en W/m, se estima como (Carballo & Iglesias, 2012):

$$P_O = \frac{\rho g^2 T_{01} H_s^2}{64\pi} \quad (1)$$

donde ρ es el peso volumétrico del agua marina; H_s , la altura de ola significativa, y T_{01} es el periodo energético del oleaje.

Para el caso de aguas someras (baja profundidad), se utiliza la celeridad de grupo correspondiente y queda la expresión:

$$P_O = \frac{\rho g^{3/2} \sqrt{h} H_s^2}{16} \quad (2)$$

donde h es la profundidad.

Potencia disponible en una corriente



La potencia teórica disponible en una corriente marina, P_c en W/m^2 , es equivalente a la potencia generada por un flujo que atraviesa una sección transversal de área unitaria, esto es (Meyer & Van Niekerk, 2016):

$$P_c = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (3)$$

donde V es la velocidad media de la corriente. Cabe señalar que en corrientes marinas reales el valor medio puede no ser el más representativo de la corriente disponible, sin embargo es válido para estimaciones globales como la que aquí se presenta.

Potencia disponible para una planta OTEC

La estimación de la potencia que produciría una planta de energía maremotérmica (OTEC por las siglas en inglés de *ocean thermal energy*

conversión), P_T , en una condición dada, en W, fue propuesta por Nihous (2007), a saber:

$$P_T = \frac{3\rho c_p Q_{ww} \Delta T^2 E}{16T_s(1 + Q_{ww}/Q_{cw})} \quad (4)$$

donde c_p es el calor específico del agua marina ($\sim 4\,000$ J/kgK); ΔT , la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y de 1 000 m de profundidad; T_s , la temperatura del agua en la superficie; Q_{ww} , el caudal tomado del agua superficial, y Q_{cw} es el caudal tomado del agua a 1 000 m de profundidad. Para el cálculo teórico se recomiendan utilizar los caudales correspondientes a una planta de 100 MW (Nihous, 2007) para los que Q_{cw} es de 250 m³/s y Q_{ww} es 1.6 Q_{cw} .

Potencia disponible por gradiente salino

De acuerdo con Kuleszo, Kroeze, Post y Fekete (2010), la cantidad de energía eléctrica disponible en la interacción entre el agua de un río y un cuerpo de agua con mayor salinidad depende de factores como los volúmenes de agua involucrados, las diferencias de temperatura, sus

propiedades químicas y los medios que se utilicen para generarla (p. ej., membranas, presión, flujo). Así, una estimación preliminar de P_s , en kW, se puede obtener de:

$$P_s = 2Q_r R T_m \left(S_r \ln \frac{2S_r}{S_r + S_s} + S_s \ln \frac{2S_s}{S_r + S_s} \right) \quad (5)$$

donde Q_{riv} es el caudal el río; R , la constante universal de los gases (8.314 J/molK); T_m , la temperatura del agua en la desembocadura del río; y S_r y S_s son las salinidades del agua de río y de mar, respectivamente. Tal como se mencionó en el caso de corrientes, la estimación teórica puede hacerse con valores medios, aunque para cálculos detallados debe verificarse la representatividad de dicho valor estadístico.

Fuentes de datos

Oleaje



La información histórica de oleaje para todo el litoral mexicano se tomó del *Atlas de clima marítimo de la república mexicana* (Silva *et al.*, 2007). Este Atlas contiene información de altura de ola significativa, dirección y periodo del oleaje, así como intensidad y dirección del viento desde 1948 hasta 2007; todo ello a partir de reanálisis de viento tomado de las bases de datos NCEP/NCAR de la NOAA del Gobierno de EUA. Esta información ya había sido utilizada por Pérez (2013), quien determinó la potencia máxima anual y por estaciones del año disponible en todo el litoral mexicano, como se muestra en la Figura 2. Las profundidades en las costas mexicanas se obtuvieron de INEGI-IBCCA (2000).

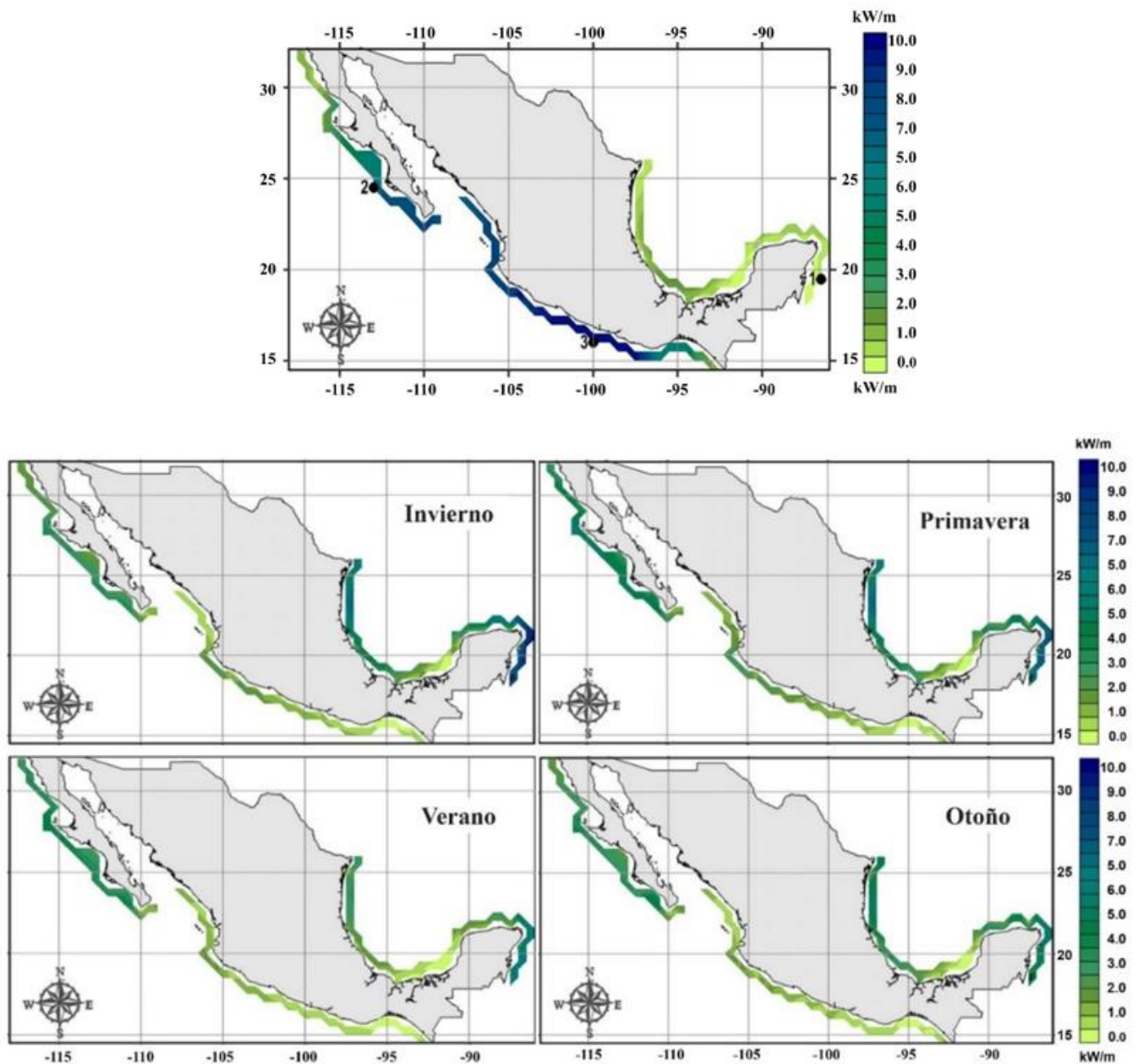


Figura 2. Potencia máxima anual (arriba) y por estaciones (abajo) disponible por oleaje en el litoral mexicano (Pérez, 2013).

Corrientes marinas

En el Caribe mexicano, la única corriente aprovechable es la corriente de Yucatán, que atraviesa el canal del mismo nombre y desemboca en el Golfo de México (Athié, Candela, Sheinbaum, Badan, & Ochoa, 2011). Las bases de datos consultadas para la estimación de la potencia disponible fueron las publicadas en *The Yucatan Current* (Gyory, Mariano, & Ryan, 2013) y los datos del proyecto Canek (Athié *et al.*, 2011; Cetina, Candela, Sheinbaum, Ochoa, & Badan, 2006; Chávez, Candela, & Ochoa, 2003); en ellos se establece que la posición de máxima velocidad de la corriente ocurre entre las coordenadas 86.4° W y 85.8° W, donde la profundidad es de aproximadamente 800 m. Cetina *et al.* (2006) reportaron que la máxima velocidad de la corriente se ubica frente a Puerto Morelos, a 20 km de la salida del Canal de Cozumel, alcanzando velocidades entre 1.5 y 2 m/s; para la corriente frente a las costas de Tulum la velocidad es, en promedio, de 1 m/s. Figueroa-González (2006) reportó que frente a Puerto Morelos se tiene una velocidad media de la corriente de 1.3 m/s, con máximo de 2.4 y mínimo de 0.1 m/s; para la corriente frente a Cozumel reporta velocidad media de 0.9 m/s con 1.5 y 0.3 m/s de máximo

y mínimo, respectivamente; y frente a Tulum la media reportada es de 0.7 m/s con máximo de 1.7 y mínimo de 0.1 m/s. Bárcenas-Graniel (2014) estimó una energía disponible de 6 000 GWh en la corriente de todo el canal de Yucatán, que tiene una longitud de 230 km y de 1 200 GWh si se aprovecharan sólo los 5 km que mide el canal de Cozumel.

Gradiente térmico

El parámetro principal para evaluar el potencial por gradiente térmico es la diferencia de temperatura entre la superficie y una cierta profundidad. Aviña y Miguel (2007) indican que en México la zona óptima a desplegar OTEC es la isla de Cozumel, pues la fuente está a menos de 10 km de la costa. Las primeras aproximaciones realizadas para este sitio las llevaron a cabo Gallegos y Czitrom (1997), quienes encontraron una diferencia de temperatura mínima de 21.9 °C y máxima de 24.5 °C durante todo el año. Para este trabajo se utilizaron los perfiles de temperatura disponibles en el World Ocean Database 2009 (WOD), en el National Oceanographic Data Center (NODC, 2013) y en la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2013). Con esta información, Bárcenas-Graniel (2014) encontró los sitios óptimos en el Caribe mexicano para la colocación de plantas OTEC (ver Figura 3).

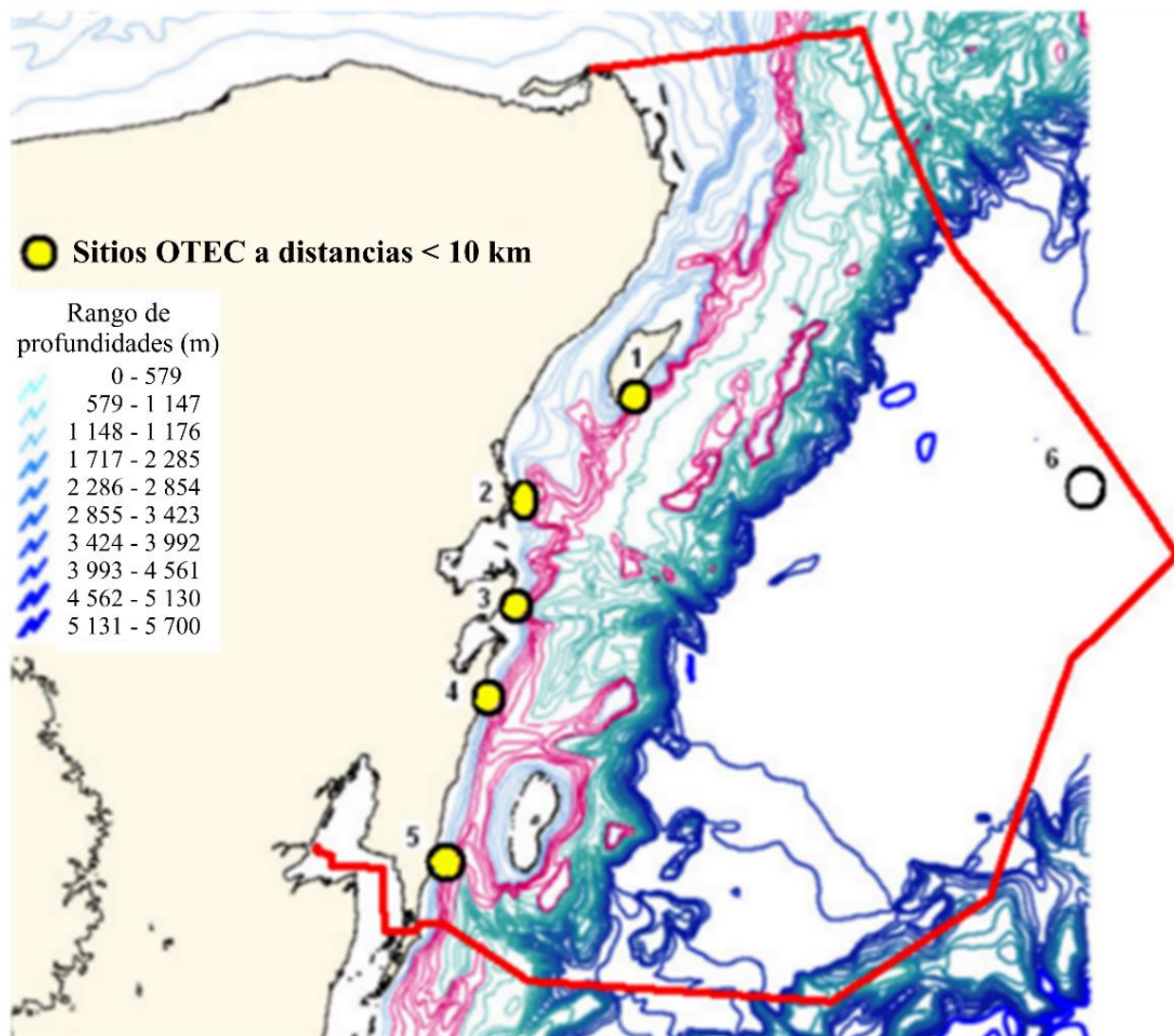


Figura 3. Sitios con mayor potencial OTEC en el Caribe mexicano (Bárcenas-Graniel, 2014).

Las isobatas en color rosa indican profundidades entre 700 y 1 000 metros, mientras que los círculos amarillos indican las cinco zonas con mayor potencial OTEC: isla de Cozumel, Punta Allen, Tulum, Sian Ka'an y Xcalac.

Gradiente salino

Quintana Roo cuenta con dos ríos: el Hondo (RH) y el Escondido (RE), que se encuentran al sur de Chetumal; el más importante es el RH debido a que es la línea divisoria entre México, Guatemala y Belice. Este río tiene una longitud de 115 km, con un escurrimiento promedio anual de 1 988.58 millones de metros cúbicos (Peña-Fierro & Sánchez-Vega, 2004). Por tal motivo, el río Hondo fue tomado como ejemplo por Bárcenas-Graniel (2014) para realizar la estimación del potencial energético por gradiente salino. Sus resultados se resumen en la Tabla 1, donde se observa que la potencia promedio obtenida fue de 43 MW y la energía anual se estimó en 380 GWh.

Tabla 1. Potencial energético por gradiente salino del río Hondo
(Bárcenas-Graniel, 2014).

Variable	Unidad	Mes											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temporada		Nortes			Secas			Lluvias				Nortes	
Flujo	m ³ /s	128	128	20	20	20	78	78	78	78	78	12	12
Salinidad	ups	13.5	13.5	20	20	20	12.5	12.5	12.5	12.5	125.	13.5	13.5
Temperatura	°C	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6
Precipitación	mm	60	30	30	30	100	200	180	150	190	160	80	60
Altura (h)	m	110.5	110.5	170	170	170	102	102	102	102	102	110.5	110.5
Potencia promedio	MW	69.4	69.4	16.7	16.7	16.7	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	69.4	69.4
Núm. de días	Días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Energía mensual	GW _{h-mes}	51	46	12	12	12	28	29	2	28	29	49	51
Energía anual	GW _{h-año}	380											

Resultados

En esta sección se presentan los hallazgos respecto de la potencia disponible en las costas del Caribe mexicano para las fuentes de corrientes, gradiente térmica y gradiente salino. En una segunda subsección se presentan las estimaciones de capacidad instalada que se podría tener en México por energía del oleaje.

Resumen del potencial energético disponible en el Caribe Mexicano

En la Tabla 2 se muestra una comparación de los potenciales de cada fuente de energía marina del Caribe mexicano. Se observa que la fuente más prometedora es OTEC, la cual, además, puede traer otros beneficios, como agua fría para aires acondicionados; acuicultura de especies de agua fría, y producción de agua potable, lo que hace de dicha técnica un campo adecuado para futuras investigaciones y desarrollo tecnológico.

Tabla 2. Potencial energético de las distintas fuentes de energía marina en el Caribe mexicano (Bárceñas-Graniel, 2014).

Fuente	Potencia promedio disponible (MW)	Energía anual (GWh/año)
Corrientes (sólo canal de Cozumel)	200	1 200
Gradiente térmico	2 000	17 500
Gradiente salino	44	380

Cabe señalar que en la estimación de la energía anual se consideró sólo el valor promedio y no la variación de la potencia, a falta de información con menor espaciamiento temporal.

En el mapa de la Figura 4 se muestran los sitios con mayor potencial energético para cada fuente de energía marina en el Caribe mexicano. Los puntos azules corresponden a energía undimotriz; los amarillos a corrientes marinas; los rojos a gradiente salino, y los verdes a OTEC. Es necesario reconocer que se requieren esfuerzos en lo que corresponde a ingeniería de detalle, planeación del recurso, impacto ambiental y análisis de ciclo de vida. La Figura 4 es muestra de que la península de Yucatán bien podría convertirse en una región con una contribución importante de fuentes marinas en su matriz energética.

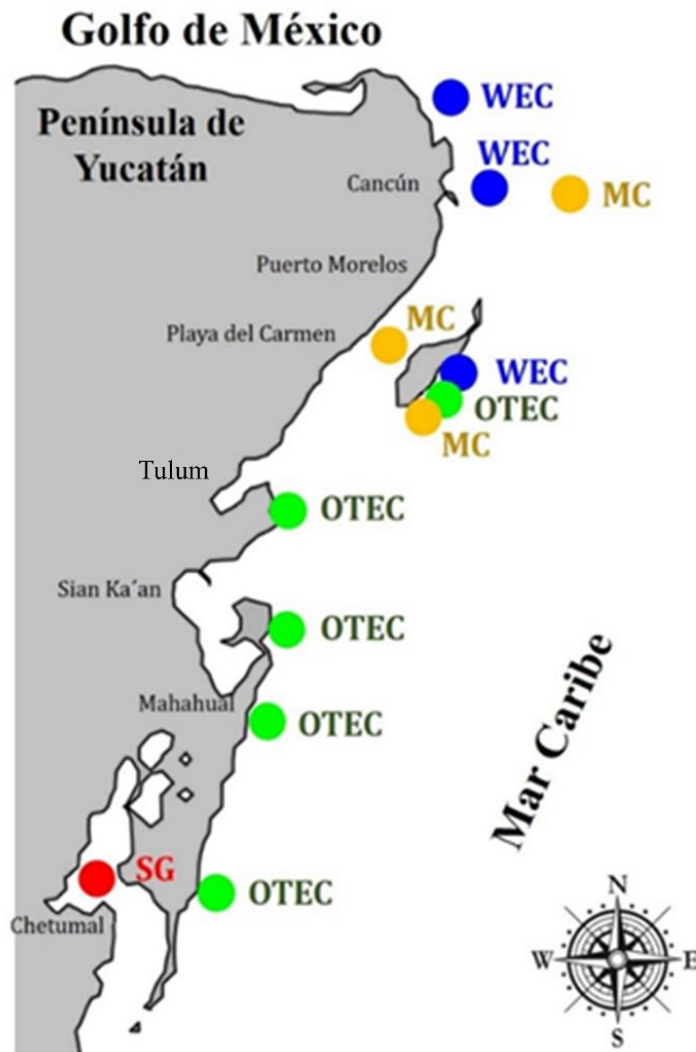


Figura 4. Sitios del Caribe mexicano con mayor potencia disponible para cada fuente de energía marina.

En la Figura 5 se presenta un resumen de la estimación de las condiciones de oleaje en aguas someras que se pueden encontrar en las

costas mexicanas de acuerdo con la información mencionada en la sección Fuentes de datos

La Figura 5A muestra los valores de altura de ola significativa representativos de tramos de litoral; el área sombreada indica las zonas con altura de ola mayor a 1.2 m. La Figura 5B, por su parte, muestra los periodos pico asociados con dichas alturas de ola y la zona sombreada indica valores mayores a 7 s. Una simple inspección visual revela las zonas donde es más conveniente planificar la explotación de la energía undimotriz.



Figura 5. Altura de ola significativa (A) y periodo pico (B) representativos por tramo de litoral para todo México.

Estimación de la capacidad instalada teórica por energía del oleaje en México

Con los datos de altura y periodo de oleaje se calculó —empleando la Ecuación (2)— la potencia disponible cerca de la costa de todo México. Con esta información se obtuvo la distribución que se presenta en la Figura 6.



Figura 6. Potencia undimotriz teórica cerca de las costas mexicanas.

Conocidas las potencias disponibles, se propone una regionalización nacional en términos del recurso disponible: Zona 1 (Baja California) con 13 a 18 kW/m disponibles; Zona 2 (Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas) con 8 a 13 kW/m disponibles; Zona 3 (Quintana Roo

y Yucatán) con 4 a 6 kW/m disponibles, y Zona 4 (Tamaulipas) con 3 a 5 kW/m disponibles. Dichas zonas están señaladas en la Figura 7.



Figura 7. Sitios con mayor potencial undimotriz en las costas de México.

De la información presentada en la Figura 6 y Figura 7 se ubicaron sitios gruesos donde es recomendable profundizar los estudios de oceanografía, ingeniería e impacto ambiental, para validar la factibilidad de instalar y operar plantas de energía undimotriz. Al nivel de detalle que corresponde a los alcances de este trabajo, los sitios son las costas de Baja California, Baja California Sur, Colima, Guerrero, Michoacán, Jalisco y Oaxaca (Figura 8).



Figura 8. Principales sitios propuestos para implementar convertidores de energía del oleaje en México.

Para hacer la estimación de la capacidad instalada teórica se consideraron tres datos adicionales. El primero es la eficiencia genérica

total de un convertidor de energía de las olas, cuyo valor, de acuerdo con Carballo e Iglesias (2012), se estima como:

$$\eta_t = \eta_p \eta_m \eta_e \quad (6)$$

donde η es la eficiencia, y los subíndices t , p , m y e corresponden a las eficiencias por la conversión de energía de olas a neumática, neumática a mecánica y mecánica a eléctrica, respectivamente. Para el ejercicio que se presenta en este trabajo se consideró un valor de $\eta_p = 0.7$, que es un valor típico para las cámaras o sistemas de captación de olas. Por otro lado, siguiendo a Webb, Seaman y Jackson (2005), se tomó $\eta_m \eta_e = 0.6$ como la eficiencia de la conversión desde energía neumática hasta eléctrica. Con ello, la eficiencia total desde la ola hasta la electricidad es de 0.42.

El segundo dato es el porcentaje de tiempo al año que se tiene disponible la potencia mostrada en la Figura 5. Estos valores se tomaron de Hernández-Fontes, Felix, Mendoza, Rodríguez-Cueto y Silva (2019), donde se reportaron porcentajes de persistencia para diferentes umbrales de potencia. En este trabajo se tomaron, para cada uno de los siete sitios mostrados en la Figura 7, los umbrales de potencia con disponibilidad de 70 % al año.

El último dato es el área marina ocupada, la cual, de acuerdo con lo presentado por Mendoza *et al.* (2014), se consideró como un polígono

cuadrado de 800 m de lado donde se colocarían cuatro filas de dispositivos, lo que da una longitud total de 3 200 m.

El resultado de esta estimación teórica de capacidad instalada se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Capacidad instalada teórica por energía undimotriz en México.

Sitio	Potencia disponible kW/m	Capacidad instalada ¹ MW	Energía anual ² GWh
1	15	20.16	123.62
2	15	20.16	123.62
3	8	10.75	65.93
4	8	10.75	65.93
5	13	17.47	107.14
6	8	10.75	65.93
7	8	10.75	65.93
Acumulado		100.80	618.11

¹Es el producto de la potencia disponible por la longitud total dentro del polígono y por la eficiencia total.

²Es la aplicación de la capacidad instalada por 70 % de horas de generación al año.

La estimación mostrada en la Tabla 3 es un cálculo conservador y teórico que considera granjas o áreas marinas ocupadas relativamente pequeñas. Aun así, retomando los valores mostrados en la Figura 1, se puede decir que con impacto ambiental limitado (por la ocupación de áreas marinas pequeñas), la conversión de la energía undimotriz en los sitios seleccionados podría contribuir con aproximadamente el 0.2 % de la capacidad instalada nacional; esto, para un país geográficamente tropical y con oleaje poco energético, no es nada despreciable.

Conclusiones

En este trabajo se ha revisado una estimación de la potencia disponible por fuentes de energía marina para el litoral mexicano. En función de la información disponible se halló, para la península de Yucatán, la potencia derivada de las fuentes corrientes, térmica y salina; mientras que para la fuente undimotriz se evaluó todo el país.

Para la energía por corrientes marinas del Caribe mexicano, la poca información disponible de la corriente de Yucatán dificulta evaluar de modo adecuado la potencia contenida en ella; sin embargo, Bárcenas-

Graniel (2014) encontró que en el canal de Cozumel se puede tener una energía disponible de hasta 1 200 GWh.

El potencial energético disponible para gradiente salino del río Hondo en el Caribe mexicano es de 44 MW y 380 GWh/año. Sin embargo, hoy día no se tiene suficiente información de campo como para determinar si es técnicamente viable su aprovechamiento en esta zona.

Las principales costas de México donde se puede encontrar el mayor potencial energético del oleaje son las costas de Baja California, Baja California Sur, Colima, Guerrero, Michoacán, Jalisco y Oaxaca.

Se propone iniciar la instalación y operación de convertidores de energía del oleaje en la península de Baja California, Michoacán y Guerrero, pues como se mostró, son las cuatro costas de México con mayor potencial energético durante todo el año.

El potencial energético promedio del oleaje en México oscila entre 8 y 14 kW/m, comparado con el potencial de países como Chile, Australia, Portugal e Irlanda, donde la potencia supera los 60 kW/m. La energía disponible de México parece baja, sin embargo el uso de granjas WEC (*Wave Energy Convertors*) y sistemas híbridos hacen de su aprovechamiento una opción viable. Aun así, se encontró que la energía undimotriz puede aportar un pequeño, pero relevante porcentaje al sistema eléctrico nacional.

Referencias

- Álvarez-Legorreta, T. (2007). *Monitoreo de la calidad del agua de la bahía de Chetumal y el RH. Informe técnico final. Clave del Proyecto: QR00-2003-001-12703*. México, DF, México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, QCYT-Fondos Mixtos.
- Athié, G., Candela, J., Sheinbaum, J., Badan, A., & Ochoa, J. (2011). Estructura de la corriente de Yucatán en los canales de Cozumel y Yucatán. *CISESE Ciencias Marinas*, 37(4A), 471-492.
- Aviña, J., & Miguel, H. (2007). *Factibilidad de instalar una planta OTEC (conversión de la energía térmica del océano) en las costas de México* (tesis para optar por el grado de Ingeniero Mecánico). Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Awerbuch, S. (2006). Portfolio-based electricity generation planning: Policy implications for renewables and energy security. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 693-710.
- Bárcenas-Graniel, J. F. (2014). *Evaluación del potencial de conversión de energía renovable en el mar caribe mexicano* (tesis de maestría). Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Carballo, R., & Iglesias, G. (2012). A methodology to determine the power performance of wave energy converters at a particular coastal location. *Energy Conversion and Management*, 61, 8-18.

- Cenace, Centro Nacional de Control de Energía. (2019). *Programa de ampliación y modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista 2019-2033*. Ciudad de México, México: Centro Nacional de Control de Energía.
- Cetina, J., Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., & Badan, A. (2006). Circulation along the Mexican Caribbean coast. *Journal of Geophysical Research*, 111, C08021.
- Chávez, G., Candela, J., & Ochoa, J. (2003). Subinertial flows and transports in Cozumel Channel. *Journal of Geophysical Research*, 108, 3037, DOI: 10.1029/2002JC001456.
- Figueroa-González, J. C. (2006). *Circulación superficial en la región costera de Rosarito a San Diego, utilizando radares de alta frecuencia* (tesis de maestría). Ciencias en Oceanografía Física, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.
- Gallegos, A., & Czitrom, S. (1997). Aspectos de la oceanografía física regional del mar Caribe. En: Lavín, M. F. (ed.). *Contribuciones a la oceanografía física de México. Monografía núm. 3* (pp. 225-242). México, DF, México: Unión Geofísica Mexicana.
- Felix, A., Hernández-Fontes, J., Lithgow, D., Mendoza, E., Posada, G., Ring, M., & Silva, R. (2019). Wave energy in tropical regions:

- Deployment challenges, environmental and social perspectives. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7, 219.
- Gyory, J., Mariano, A. J., & Ryan, E. H. (2013). *The Yucatan current. ocean surface currents*. Recuperado de <https://oceancurrents.rsmas.miami.edu/caribbean/yucatan.html>.
- Hernández-Fontes, J. V., Felix, A., Mendoza, E., Rodríguez-Cueto, Y., & Silva, R. (2019). On the marine energy resources of Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7, 191, 1-20.
- INEGI-IBCCA, Instituto Nacional de Estadística-Geografía-Carta Batimétrica Internacional de Mar Caribe y Golfo de México. (2000). *Datos vectoriales de la carta batimétrica internacional del mar Caribe y Golfo de México. Hoja 1-06, en formato digital escala 1:1000,000, proyección cartográfica normal de mercator y sistema geodésico de referencia WGS-84*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística-Geografía-Carta Batimétrica Internacional de Mar Caribe y Golfo de México.
- Kuleszo, J., Kroeze, C., Post, J., & Fekete, B. M. (2010). The potential of blue energy for reducing emissions of CO₂ and non-CO₂ greenhouse gases. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 7, 89-96.
- Mendoza, E., Silva, R., Zanuttigh, B., Angelelli, E., Lykke-Andersen, T., Martinelli, L., Harck Nørgaard, J., & Ruol, P. (2014). Beach response to wave energy converter farms acting as coastal defense. *Coastal Engineering*, 87, 97-111.

- Meyer, I., & Van Niekerk, J. L. (2016). Towards a practical resource assessment of the extractable energy in the Agulhas Ocean current. *International Journal of Marine Energy*, 15, 116-132.
- Melikoglu, M. (2018). Current status and future of ocean energy sources: A global review. *Ocean Engineering*, 148, 563-573.
- Nihous, G. C. (2007). A preliminary assessment of ocean thermal energy conversion resources. *Journal of Energy Resources Technology*, 129, 10.
- NOAA, National Oceanic Atmospheric Administration. (2013). *National Oceanic Atmospheric Administration*. Recuperado de <http://www.noaa.gov/>
- NODC, National Oceanographic Data Center. (2013). *National Oceanographic Data Center*. Recuperado de <http://www.nodc.noaa.gov>
- OES, Ocean Energy Systems. (2020). *OES-Environmental 2020 State of the Science Report. Environmental effects of marine renewable energy development around the world*. Lisboa, Portugal: Ocean Energy Systems.
- OES, Ocean Energy Systems. (2018). *Spotlight on 20 ocean energy projects and 5 policy initiatives*. Lisboa, Portugal: Ocean Energy Systems.
- Peña-Fierro, S., & Sánchez-Vega, A. D. (2004). Disponibilidad de agua superficial en la cuenca transfronteriza del RH-subcuenca río

- Escondido, Quintana Roo. En: Kauffer-Michel, E. F. (ed.). *La frontera México-Guatemala-Belice* (pp. 497-507). Tuxtla Gutiérrez, México: El Colegio de la Frontera Sur, The Nature Conservancy, Universidad Autónoma de Chiapas.
- Pérez, A. (2013). *Estimación del clima marítimo y la energía del oleaje disponible en las costas mexicanas* (tesis de maestría). Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Silva, R., Ruiz, G., Posada, G., Pérez, D., Rivillas, G., Espinal, J., Mendoza, E. et al. (2007). *Atlas de clima marítimo de la vertiente Pacífica Mexicana*. México, DF, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Webb, I., Seaman, C., & Jackson, G. (2005). *Arup energy oscillating water column wave energy converter evaluation report*. London, UK: The Carbon Trust, Marine Energy Challenge.