Felix Delgado, A., Mendoza-Baldwin, E., Chávez, V., Silva, Casarín R. 2023 Energía marina. p. 405-428. En; Rivera-Arriaga E., Azuz-Adeath, I. (eds). La Década del Océano en México 2021-2030: La Ciencia que Necesitamos. RICOMAR, Universidad Autónoma de Campeche. 472 p. ISBN 978-607-8907-12-0. doi 10.26359/EPOMEX01202314

Energía marina

A. Felix Delgado, E, Mendoza- Baldwin, V. Chávez, y R. Silva Casarín

Resumen

Para reducir el calentamiento global, es esencial la generación de electricidad a partir de fuentes de energía renovables que no alteren de manera negativa a los ecosistemas. El interés que despiertan las fuentes de energía marinas es considerable, aunque el desarrollo de tecnologías para su conversión ha sido más lento que en otros campos de las energías renovables. La capacidad instalada de plantas marinas en todo el mundo es de sólo 526.84 MW, la mayoría de los cuales se generan a partir del oleaje y las corrientes marinas. Esto se debe a que las tecnologías de aprovechamiento de las energías marinas son muy específicas para cada lugar, en términos de distribución global de las energías disponibles, y desde la perspectiva de la investigación-desarrollo-innovación. Además, a diferencia del aprovechamiento de otras fuentes de energía renovable, los estándares que se han establecido en cuanto a su sostenibilidad socio-ambiental y rentabilidad económica son muy estrictos.

En México se pretende que las fuentes de energía marinas contribuyan al cumplimiento de los compromisos adquiridos en el Acuerdo de París, y al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 de la ONU (energía asequible y no contaminante). Se han implementado varias políticas para fomentar el avance tecnológico en este campo, siendo la principal el CEMIE-Océano. Este centro ha realizado estudios

de evaluación del potencial energético, a macro y microescala, así como dirigiendo el desarrollo de dispositivos y materiales, realizando evaluaciones de impacto socio-ambiental, además de investigar la interconexión con la red eléctrica y los sistemas de almacenamiento de energía relacionados con las distintas energías marinas (olas, corrientes, gradiente térmico, gradiente salino, eólica, geotérmica y biomasa). Para cumplir con los compromisos del Acuerdo de París, son muchos los retos a superar y, por ello, una tarea fundamental ha sido la elaboración de hojas de ruta tecnológicas que establezcan el estado actual y el camino recomendado para cada tecnología, así como las viabilidades de su inserción en el mercado eléctrico mexicano. En este capítulo se analiza un panorama de los principales obstáculos y oportunidades legales y tecnológicas a nivel nacional e internacional.
Palabras clave: Energía renovable, fuentes de erngía , Energía mrina limpia, Enrgía por oleaje, Energía por mareas, tidal energy, Energía por gradiente térmico, Emergóa por salinidad.

Abstract

To reduce global warming, electricity generation from renewable energy sources that do not adversely affect ecosystems is essential. Interest in marine energy sources is considerable, although the development of technologies for their conversion has been slower than in other renewable energy fields. The installed capacity of marine plants worldwide is only 526.84 MW, most of which is generated from wave and ocean currents. This is because marine energy harnessing technologies are highly site-specific, in terms of the overall distribution of available energy, and from a research-development-innovation perspective. Furthermore, unlike the use of other renewable energy sources, the standards that have been established in terms of socio-environmental sustainability and economic profitability are very strict.

In Mexico, marine energy sources are intended to contribute to the fulfilment of the commitments made in the Paris Agreement, and to the fulfilment of the UN Sustainable Development Goal 7 (affordable and clean energy). Several policies have been implemented to foster technological progress in this field, the main one being CEMIE-Océano. This centre has carried out studies to assess energy potential, at macro and micro scales, as well as directing the development of devices and materials, carrying out socio-environmental impact assessments, in addition to researching interconnection with the electricity grid and energy storage systems related to the different marine energies (waves, currents, thermal gradient, saline gradient, wind, geothermal and biomass). In order to meet the commitments of the Paris Agreement, there are many challenges to overcome and, therefore, a fundamental task has been the development of technology roadmaps that establish the current status and recommended path for each technology, as well as the feasibilities of their insertion in the Mexican electricity market. This chapter analyses an overview of the main legal and technological obstacles and opportunities at national and international level.
Keywords: renewable energy sources, clean marine energy, wave energy, tidal energy, thermal gradient energy, salinity gradient energy

Las energías marinas en el mundo

Marco legislativo histórico de las energías renovables

Una de las premisas sobre las que se apoya la vida moderna, tal como se concibe en la actualidad, es la disponibilidad de energía a todas horas, en cantidades ilimitadas y a bajo costo. En el último medio siglo, el deterioro ambiental y la volatilidad de los precios resultado de la masificación de las energías basadas en quema de hidrocarburos, ha mostrado que este paradigma energético es inviable tanto respecto del tipo y volumen de la demanda como de la producción y distribución.

Uno de los primeros momentos críticos que apuntaron a la necesidad de un cambio en el modelo energético ocurrió en 1972 durante la Cumbre de la Tierra realizada en Estocolmo. Allí se creó el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), que buscaba: i) el compromiso a nivel político y programático para ayudar a países en desarrollo a aplicar políticas y prácticas ecológicamente racionales; ii) crear conciencia mundial de los problemas ambientales; y iii) evaluar y determinar el estado ambiental mundial. Esto último llevó a la fundación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), panel que elabora un informe anual para facilitar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta (IPCC, 2021).

Sin embargo, fue hasta la Cumbre de Río en 1992, cuando se creó la Convención Macro de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). En ella se aborda la importancia de luchar contra el cambio climático a partir de estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) "a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático". También establece que "tal nivel debe alcanzarse dentro de un marco de tiempo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático…". Esta convención entró en vigor en marzo de 1994 y a la fecha ha sido ratificada por 197 países (UNFCCC 2021e).

Desde aquellos años quedó establecido que las acciones a realizar en materia de cambio climático se planearían en las Conferencias de las Partes (COP, Conference of the Parties), definidas como el órgano supremo de toma de decisiones de la CMNUCC. La primer COP se realizó en Berlín en 1995, los trabajos dentro de estas conferencias son el intercambio de información, negociación y establecimiento de acuerdos conjuntos de los países participantes para abordar el cambio climático, así como, examinar los inventarios de emisiones presentados por las partes (UNFCCC, 2021b).

En la COP3 realizada en 1997, se creó el Protocolo de Kioto, que entró en vigor en 2005 y actualmente ha sido ratificado por 192 países. Su objetivo principal era la reducción media de las emisiones de los GEI en 5 %, en comparación con los niveles de 1990, para un primer horizonte fijado en 2012 (CMNUCC, 1997); en ese año se aprueba en Doha (Qatar) la Enmienda al Protocolo de Kioto para un segundo periodo de compromiso que finalizaría el 2020. A la fecha, esta enmienda no ha entrado en vigor (UNFCCC, 2021a).

En el año 2015 se llevó a cabo la COP21, donde se generó el Acuerdo de París. En

este acuerdo se marcó un hito ya que, por primera vez, se logró un acuerdo jurídicamente vinculante aprobado por 196 partes y entró en vigor en noviembre del 2016. Su meta principal fue limitar el calentamiento mundial por debajo de 2 °C (preferentemente 1.5 °C), en comparación con los niveles preindustriales. Los trabajos se enfocaron en los siguientes 5 años, donde los países deberían presentar sus planes de acción climática (NDC, contribuciones determinadas a nivel nacional). Dentro de este Acuerdo también se realizó un marco para el apoyo financiero, técnico y de creación de capacidades, para aquellos países que lo necesitaran (UNFCCC, 2021c).

Así pues, para dar seguimiento a la agenda climática global, donde la prioridad es la reducción de emisiones de GEI, es necesario que el consumo energético (generación de electricidad, calefacción y transporte) sea abastecido por fuentes de energía renovable.

De manera simultánea a las reuniones antes mencionadas, las Naciones Unidas realizaron esfuerzos desde la Conferencia sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables en 1981, para crear una organización intergubernamental que promoviera el uso de energía renovable. Estos esfuerzos se vieron materializados 4 de abril de 2011, cuando inició operaciones la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, International Renewable Energy Agency). IRENA cuenta con 167 miembros, que lideran la trasformación energética mundial hacía la energía renovable. Además, funciona como una red de colaboración, fuente de asesoramiento y apoyo a países desarrollados y en vías de desarrollo y genera sinergias de trabajo con la industria privada, centros de investigación y agencias gubernamentales (IRENA, 2021a).

A los esfuerzos mencionados se suma la definición de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), una iniciativa mundial que se emprendió en 2000, cuya meta es incentivar la dignidad en la pobreza (evitar la pobreza extrema, el hambre, enfermedades mortales asociadas y ampliar la educación, entre otros), y enfocar el desarrollo. En 2015, se retomaron estos objetivos y se crearon los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con la meta de alcanzar un desarrollo equilibrado entre sostenibilidad social, económica y ambiental. Es un llamado global a la acción de 17 objetivos para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar para el 2030 que todas las personas disfruten de paz y prosperidad (United Nations, 2017).

El uso de fuentes de energía renovable da lugar al cumplimiento dos objetivos de manera directa: el 7 “Energía asequible y no contaminante” y el 13 “Acción por el clima”. Mientras que de forma indirecta también apoyan a los objetivos: 1 “Fin de la pobreza”, 2 “Hambre cero”, 5 ”Igualdad de género”, 6 “Agua limpia y saneamiento”, 8 “Trabajo decente y crecimiento económico”, 9 “Industria, innovación e infraestructura”, 14 “Vida submarina” y 17 “Alianzas para alcanzar los objetivos” (IRENA, 2020b).

En específico, para 2030 el objetivo 7 busca:

- Garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.
- Aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.
- Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
- Aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía lim-

pia (renovables, eficiencia energética, tecnologías avanzadas y menos contaminantes).
- Promover la inversión de inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias.
- Ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles en los países en desarrollo.

Por último, IRENA y CMNUCC en agosto de 2019 se asociaron para intensificar el intercambio de conocimiento sobre transición energética, colaborar más estrechamente en las reuniones de expertos, aumentar la creación de capacidad para promover las energías renovables y emprender actividades de divulgación conjuntas (UNFCCC, 2021d).

En resumen, los esfuerzos de instancias globales y regionales han avanzado en establecer un marco para favorecer el cambio de modelo energético. Consecuentemente, produjeron un creciente interés por incorporar fuentes de energía renovable en las cadenas de producción locales, a la vez que propiciaron la creación de fondos nacionales e internacionales para la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías. Del mismo modo, han abierto líneas de comunicación al interior de los estados miembros para crear la ruta que lleve a cumplir con las metas acordadas de reducción de emisión de GEI. Quizás la principal área de oportunidad en el cambio de modelo energético son los canales que dependen de los gobiernos nacionales los que, como es el caso de México, no terminan por establecer una política pública franca de planeación e inversión en la incorporación de las fuentes de energía renovable.

A pesar de ello, globalmente y principalmente a nivel académico y privado, el desarrollo tecnológico ha encontrado cabida. En ese sentido, es de reconocer que el medio en el que se encuentra una mayor variedad de fuentes de energía y con densidades elevadas es el océano. Las fuentes de energía marinas han cobrado interés por su alta disponibilidad y, en algunos casos, predictibilidad, que permiten pensar en proveer energía base a las matrices nacionales. Adicionalmente, el uso de las fuentes de energía marina tiene potencial para impulsar globalmente la economía azul y localmente economías circulares puesto que supone una amplia gama de productos secundarios como son refrigeración, acuacultura y desalación de agua (IRENA, 2021a).

Avances tecnológicos de las energías marinas

Cerca del 40 % de la población del planeta se concentra en una franja menor a los 100 km del litoral y se espera que esta cifra se duplique en los próximos años. Tomando en cuenta que la línea de costa mundial mide aproximadamente 600 000 km, y que en las próximas décadas la mayoría de la población habitará en estas zonas, el uso del recurso energético marino aparenta ser una solución viable para cubrir un porcentaje importante de la demanda global. Por otro lado, el potencial energético explotable en las zonas costeras y marinas es mucho mayor que lo que se ha contabilizado en zonas terrestres. Estas dos aseveraciones sitúan a la energía marina como una fuente prioritaria de desarrollo tecnológico.

La energía disponible en océanos y mares, puede aprovecharse tanto en zonas costeras como en zonas profundas. Un primer agrupamiento resulta en tres tipos básicos de energía presente en el océano: mecánica, térmica y química. La primera puede originarse por la rotación de la tierra o por fuerzas de atracción gravitacional entre la

Tierra y otros astros (principalmente la luna); la acción de estas fuerzas produce agentes físicos como el viento, oleaje, corrientes y mareas que son, en última instancia, los fenómenos cuya energía se captura y convierte. La energía térmica proviene del calentamiento de la superficie marina por la incidencia solar la cual, combinada con agua fría de las profundidades marinas, puede emplearse para activar un ciclo de potencia. Finalmente, dentro de todas las propiedades químicas del agua de mar, la salinidad es la más característica. Por ello, la energía liberada durante el encuentro de un cuerpo de agua salado con uno dulce, es una fuente que ha despertado gran interés recientemente.

Los agentes mencionados se convierten, entonces, en las fuentes de energía marina mayormente estudiadas: eólica marina, undimotriz, mareomotriz, hidrocinética, térmica oceánica y osmótica. Como se mencionó antes, el recurso global disponible en estas fuentes supera ampliamente la demanda energética mundial, sin embargo, existen aún importantes retos tecnológicos que detienen su utilización a precios competitivos (Huckerby *et al.,* 2017).

Comparadas con otras fuentes renovables como hidroeléctrica, solar o eólica, las fuentes marinas tienen poco tiempo y madurez de desarrollo. Sin embargo, en los últimos 15 años se han realizado grandes esfuerzos enfocados principalmente en mareomotriz y undimotriz. Esto ha derivado en una gran brecha en las etapas de desarrollo de las tecnologías para convertir las diferentes fuentes de energía marinas (OES, 2017).

En los siguientes apartados se presenta una breve revisión del estado actual de desarrollo para cada fuente de energía marina.

Undimotriz (oleaje)

Como se mencionó antes, el oleaje es producido por la acción del viento sobre la superficie del océano. La combinación del cual, con la fuerza restauradora de la atracción gravitacional terrestre da origen a un flujo oscilatorio superficial que se desplaza hacia la costa. Dicho flujo presenta varios mecanismos con posibilidad de extracción de energía, por ejemplo, el desplazamiento horizontal del flujo o el ascenso y descenso de la superficie del mar. Por otro lado, en costas de latitudes altas (más de 40° sobre el Ecuador) y orientadas al oeste de los continentes, donde los vientos alisios soplan en grandes extensiones de mar abierto, la energía undimotriz disponible es mayor (OES, 2017).

Los dispositivos diseñados para convertir esta energía, se enfocan en capturar la energía cinética (desplazamientos) o potencial (cambios de elevación) de las olas, pero rara vez ambas. El potencial undimotriz teórico mundial se ha calculado en 29,500 TWh/año (Mørk *et al.*, 2010).

La mayoría de los convertidores de energía undimotriz (WEC, por Wave Energy Converters) se espera que funcionen dentro del rango de 15 a 75 kW/m, sin embargo, deben ser capaces de operar en una amplia gama de estados de mar, sobrevivir a condiciones extremas (tormentas) y deben ser lo suficientemente robustos para funcionar sin supervisión. Por lo tanto, no hay consenso para el diseño de dispositivos y parece improbable que domine un único concepto. Además, al ser relativamente pequeña su capacidad de producción, están destinados a ser instalados en parques con múltiples unidades.

A la fecha existen diferentes tipos de tecnologías para la extracción de la energía

undimotriz que se pueden agrupar en: atenuadores (estructura larga flotante, alineada paralela a la dirección del oleaje); terminadores (sistema que concentra la energía a través de paredes convergentes y una rampa); columnas de agua oscilantes (localizados sobre una estructura fija, genera una columna de agua ascendente y descendente con el paso de la ola); convertidores de oscilación horizontal (extraen energía del movimiento horizontal del oleaje, comúnmente próximos a costa y cimentados en el fondo); absorbedores puntuales (dispositivo flotante, absorbe la energía en todas direcciones, fijados al fondo marino o completamente flotantes), entre otros(OES, 2017). Actualmente la capacidad instalada operativa es de 2.31 MW (IRENA, 2020b).

Mareomotriz potencial (elevaciones de marea)

Esta fuente es la energía potencial producida por los cambios de altura en el nivel del mar por la acción, principalmente, de la marea astronómica. Las mareas astronómicas son fáciles de predecir, sin embargo, todas las áreas costeras y oceánicas se ven influenciadas por la marea meteorológica (cambios de clima locales). El ascenso y descenso de la marea ofrece la oportunidad de atrapar una pleamar y retrasar su descenso detrás de un dique o embalse para aprovechar la energía potencial antes del siguiente ciclo de marea (OES, 2017).

En algunas zonas costeras del planeta el rango de marea puede alcanzar hasta 17 m y puede ocurrir una o dos veces en 24 horas. El potencial teórico mundial de la energía mareomotriz ha sido estimado en torno a 1200 TWh/año (OES, 2017).

Las tecnologías para aprovechar esta fuente, son maduras pues derivan de las empleadas en las hidroeléctricas, que utilizan turbinas. Los casos más representativos son la planta de 254 MW en la República de Corea (que entró en funcionamiento en 2011), una planta de 240 MW en Francia (1966) y una central de 20 MW en Canadá (1984), y 7.5 MW restantes son dividido entre dos plantas en China (4.1 MW) y la Federación Rusa (3.4 MW). Existe una cartera de más de 2.5 GW en proyectos planificados en todo el mundo, lo que indica que el mercado todavía tiene oportunidades de crecer, a pesar de que no se han observado grandes cambios tecnológicos en los últimos años (IRENA, 2020b).

Mareomotriz cinética (corrientes de marea)

Esta energía está contenida en el movimiento de una masa de agua resultado de los cambios de marea, que se manifiesta como una corriente que cambia de sentido cada 12 o 24 horas. Esta energía se aprovecha, generalmente, cerca de la costa y en particular donde se encuentran constricciones geomorfológicas, como estrechos, islas y puertos. Se estima que la capacidad energética global podría ofertar 1200 TWh.

Los dispositivos de corriente de marea aprovechan la energía cinética de forma bidireccional, generalmente alcanzando picos de flujo mayores a 2 m/s. Las principales diferencias entre los tipos de dispositivos están relacionadas con el método de fijación de la turbina in situ, el número o forma de álabes y cómo se controla el cabeceo de las mismas. Los dispositivos pueden estar fijados en el fondo del mar o ser flotantes, estos son generalmente pequeños (<1 MW), por lo que es necesario parques con múltiples unidades para la generación a gran escala (OES, 2017).

Al igual que con los WEC, existe una amplia variedad de dispositivos que constan de turbinas que al girar impulsan un generador eléctrico: de eje horizontal (rotor de 2 o 3

álabes con eje montado horizontalmente); de eje vertical (rotor de 2 o 3 álabes con eje montado verticalmente); y de flujo cruzado (rotor de múltiples álabes, horizontales con eje central transversal a la dirección de la corriente) (OES, 2017). En los últimos 15 años se han desarrollado y probado mayormente turbinas de eje horizontal (similares a los eólicos). La capacidad operativa actual es de 10.6 MW (IRENA, 2020b).

Hidrocinética (corrientes oceánicas)

Las corrientes oceánicas circulan en patrones complejos alrededor de los océanos del mundo, se consideran de dos tipos: superficiales, impulsadas por el viento y el calentamiento solar de las aguas cerca del ecuador; y profundas, resultado de las variaciones de densidad y salinidad (circulación termohalina). A diferencia de las corrientes asociadas a procesos costeros, suelen ser lentas (a penas superiores a 1 m/s) y unidireccionales, se considera una tecnología inmadura por el nivel de desarrollo de los dispositivos, sin embargo, su potencial de desarrollo es alto debido a que poseen alta predictibilidad y persistencia.

Térmica oceánica (gradiente térmico)

Esta energía marina es conocida como OTEC (por Ocean Thermal Energy Conversion). Se aprovecha la diferencia de temperaturas entre el agua superficial, que puede ser muy superior a la temperatura del agua batial (profundidades mayores a 750 m), donde la temperatura es relativamente constante en torno a los 4-6 °C. Con esta diferencia de temperaturas se pone en acción un ciclo termodinámico (tipo Rankine) capaz de mover una turbina de vapor. La tecnología, en su estado actual, requiere una diferencia de temperatura mínima de 20 °C entre el agua caliente superficial y el agua fría de las profundidades marinas para ofrecer una eficiencia aceptable. En la actualidad existen tres procesos para la conversión de OTEC: ciclo abierto (usa solo agua marina), ciclo cerrado (usa agua marina y un fluido de trabajo con puntos de ebullición y condensación cercanos) y dispositivos híbridos (usan contribución de energía solar o eólica).

El potencial mundial de conversión de energía térmica oceánica ha sido calculado aproximadamente en 44000 TWh (Nihous 2007). Hay que tener en cuenta que este potencial se concentra alrededor de los trópicos en áreas donde las profundidades oceánicas superan los 1000 m (OES, 2017).

Una forma de incrementar la rentabilidad de las instalaciones OTEC incluyen es a través de productos secundarios, entre los que se cuentan: la producción de agua potable, provisión de agua fría para acuacultura, refrigeración y aire acondicionado.

Osmótica (gradiente salino)

El gradiente salino es el que se obtiene de la diferencia en la concentración de sal de agua dulce de ríos (0.5 ppm) y el agua de mar (30 a 50 ppm). La fuente aprovechable proviene de capturar, antes de su liberación, la energía derivada del encuentro de masas de agua dulce y salada. Los principales mecanismos de conversión son: aprovechar la presión osmótica o separar la molécula de la sal en iones para producir un par REDOX. El potencial teórico mundial para la energía de gradiente salino se ha estimado en 1650 TWh (Skråmestø *et al.,* 2009).

Las tecnologías ya desarrolladas para el aprovechamiento de esta energía son la Osmosis por Presión Retardada (PRO) y la Electrodiálisis Inversa (RED). Se han propuesto otras tecnologías, como generadores

hidrocráticos, estanques solares (compresión de vapor) y motores térmicos osmóticos (OES 2017). Estas tecnologías, a la fecha, han avanzado poco en prototipos implementados en condiciones relevantes.

Eólica marina

Debido a su ubicación en alta mar, su alta producción de energía por metro cuadrado y su capacidad para construirse rápidamente a escala de GW, la energía eólica marina es una opción valiosa para proporcionar electricidad a áreas costeras densamente pobladas de manera rentable. Los desarrollos tecnológicos de turbinas, así como, en cimentaciones, instalación, acceso, operación e integridad de sistemas han hecho posible el avance hacia aguas más profundas y más alejadas de la costa, llegando así a sitios con mayor potencial energético. En los últimos 5 a 10 años, la energía eólica marina ha alcanzado la madurez, lo que la convierte en la tecnología más avanzada entre las energías renovables marinas (IRENA, 2019).

Los parques eólicos marinos se presentan con dos tipos de cimientos fijos y flotantes, los primeros son el tipo de instalación más común, con casi 34 GW de capacidad instalada acumulada a fines de 2019 (IRENA, 2019); también son, con mucho, las tecnologías de energías renovables en alta mar más maduras. Estas turbinas, se están desplegando en profundidades de agua de entre 40 m y hasta 60 m, y a una distancia de hasta 80 km de la costa (IRENA, 2021b). Los cimientos flotantes buscan la extracción de energía en aguas más profundas y no sólo eso, facilitaran la instalación en zonas cercanas a la costa, además de reducir el impacto ambiental en el fondo marino (IRENA, 2019).

En los últimos años se desarrolla una nueva tecnología "Eólica Aerotransportada" (AWES, por sus siglas en inglés), se basan en palas o alas, a altitudes de 200 a 450 metros (potencialmente incluso más altas), unidos al suelo a través de una cuerda que hace girar un cabrestante que impulsa un generador (Hill, 2017). Siguen dos principios para producir electricidad: ya sea a través de pequeñas turbinas de hélice, con los generadores montados en el ala voladora, o desenrollando la cuerda de un tambor ubicado en la plataforma terrestre que impulsa el generador (AWE, 2020)which is driving the generator (second picture.

A fines de 2020, la capacidad eólica marina instalada global era de más de 34 GW, 6 GW más que en 2019. Más del 70 % de la capacidad eólica marina instalada se encuentra en Europa. Durante las últimas dos décadas, Bélgica, Dinamarca, China, Alemania y el Reino Unido (UK) han liderado el despliegue de energía en alta mar en el mercado global. En 2020, China registró la mayor capacidad de nuevas instalaciones eólicas marinas con más de 3 GW, seguida de Holanda con 1,5 GW, Bélgica con 0,7 GW y Reino Unido con 0,4 GW. Los países europeos dominan tanto en cimientos eólicos flotantes como en proyectos de demostración de energía eólica aerotransportada (IRENA, 2021a).

Recientemente, la empresa danesa de turbinas eólicas Vestas anunció un gran avance en las turbinas eólicas marinas diseñadas específicamente para áreas propensas a los tifones. La turbina de 15 MW tiene la calificación de turbina eólica más alta del mundo y se probará por primera vez en 2022, con producción programada para 2024 (Hanley Steve, 2021).

Solar marina

La energía solar, también conocida como fotovoltaica flotante (FPV, por sus siglas en inglés), puede considerarse como el ter-

cer pilar del mercado fotovoltaico mundial junto con la energía solar fotovoltaica montada en suelo y en azoteas, debido a la creciente demanda de dicha tecnología, especialmente en países con disponibilidad limitada de terrenos, como como países e islas densamente poblados (IRENA, 2020a).

El desarrollo tecnológico para aprovechar esta fuente está impulsado por la teoría de que la FPV en el mar funciona, en promedio, un 13 % más eficiente (en kWh/m² instalados) que la energía solar fotovoltaica en tierra, debido a temperaturas más bajas y menos nubosidad (Golroodbari y van Sark, 2020). Aunque actualmente este tipo de extracción esta en etapas iniciales de desarrollo, se esperan proyectos comerciales en funcionamiento en el 2024 (IRENA, 2021b). Actualmente ya existen plantas en funcionamiento en agua dulce.

Impacto ambiental de las energías marinas

La zona costera se caracteriza por tener un equilibrio muy frágil tanto geomorfológica como biológicamente. La modificación de las corrientes de viento y oceánicas, la modificación de los procesos costeros y las riberas de los ríos puede provocar impactos ambientales significativos a nivel local (ENS n.d.; TETHYS n.d.; White y Case, 2019). Se sabe relativamente poco sobre los efectos de estas tecnologías en la vida marina debido a que se encuentran en etapas iniciales de implementación. Podrían surgir impactos negativos en forma de pérdida de hábitat, interacciones entre la fauna y turbinas, ruido y campos electromagnéticos producidos por cables marinos, que pueden tener efectos sobre las especies acuáticas (ENS n.d.; TETHYS n.d.; White y Case, 2019). El impacto ambiental de las tecnologías de energía marina aún es incierto (IRENA, 2021b).

Sin embargo, se está trabajando para garantizar que dichos riesgos puedan gestionarse adecuadamente. Algunos estudios indican que la energía marina también puede tener impactos positivos y respaldar la biodiversidad mediante el uso de arrecifes artificiales, dispositivos de agregación de peces y áreas marinas protegidas. Como para cualquier proyecto de infraestructura, se deben aplicar los estudios de evaluación de impacto ambiental adecuados, y a medida que estas tecnologías maduren, el conocimiento obtenido durante su desarrollo ayudará a mitigar cualquier riesgo potencial y maximizar sus beneficios (IRENA, 2021b).

En consecuencia, los estudios realizados alrededor del mundo mencionan que es importante evaluar adecuadamente los impactos potenciales e incluir medidas de mitigación en el diseño de las instalaciones, la operación y el mantenimiento. Sin embargo, los requisitos de evaluación de impacto ambiental y los procedimientos de concesión de licencias posteriores difieren de un país a otro, y en algunos casos no existen, especialmente con respecto a la lista de impactos potenciales a considerar y mitigar (White y Case, 2019).

IRENA menciona que la falta de seguridad en las políticas públicas crea dificultades considerables para los desarrolladores de proyectos y genera riesgos adicionales para los inversores y demoras significativas para los inicios de trabajos (IRENA, 2021b). Por lo anterior es necesaria la armonización de los requisitos y procedimientos de los estudios de impacto ambiental, al menos a nivel regional; es necesario el establecimiento de una base de datos común que defina los impactos potenciales, suposiciones, hipótesis y parámetros a tener en cuenta, así como las posibles medidas de mitigación para cada tecnología (IRENA, 2021b). Con lo an-

terior será posible facilitar la evaluación del impacto ambiental y acelerar su despliegue en todo el mundo.

Consideraciones sociopolíticas

La Gobernanza de los océanos y la cooperación internacional es necesaria para alcanzar el desarrollo de las energías marinas (IRENA, 2021b). Más de dos tercios de los océanos no están gobernados, forman parte de los llamados bienes comunes globales (Speer *n.d.*). Esto deja mucho espacio a la incertidumbre y puede conducir a disputas de propiedad entre comunidades, países y sectores, particularmente en áreas donde ya existen pesquerías, conservación, navegación y defensa, y ahora por su explotación energética. Las líneas de trabajo en este aspecto, se realizan en la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, que trabaja la gobernanza de los océanos y busca la cooperación multilateral para el despliegue de proyectos de energías renovables.

A nivel de Estado, es necesario generar los marcos de políticas, leyes y normas, que permitan adoptar las tecnologías marinas, todo ello ayuda a brindar visibilidad de las tecnologías disponibles, aumenta la conciencia pública y señala a los inversores la necesidad de financiar dichos proyecto, aumentando la confianza y reduciendo los riesgos percibidos (Hemer *et al.,* 2018).

Los impactos visuales potenciales y la falta de familiaridad con las tecnologías renovables marinas emergentes, son propensos a provocar el rechazo de las comunidades cercanas, como se vio con la construcción de nuevas líneas de transmisión o algunos proyectos renovables alrededor del mundo, por ello, IRENA menciona también la importancia de hacer conciencia pública, y trabajar la aceptación social y preparación de la comunidad para llevar a cabo la implementación de estas energías (IRENA, 2021b).

Perspectivas del crecimiento de las energías marinas

Las tecnologías de energía marina son emergentes y de nicho con el potencial de impulsar a las comunidades costeras, así como de impulsar una economía azul. Según el análisis de IRENA, el potencial de recursos acumulativo mundial oscila entre 45,000 TWh y muy por encima de los 130,000 TWh anuales (IRENA, 2020d). Por lo tanto, la energía marina por sí sola tiene el potencial de satisfacer más del doble de la demanda mundial actual de electricidad.

Actualmente, la mayoría de las tecnologías de energía marina no han llegado a la comercialización y aún se encuentran en etapas de desarrollo, muchas todavía en fase de prototipo, con la excepción de algunas que alcanzan la comercialización temprana. El crecimiento en el sector de la energía marina ha sido más lento de lo esperado. Sin embargo, la última década ha sido testigo de un progreso notable en las fuentes de energía mareomotriz y undimotriz. La capacidad mundial instalada actual es: Europa 55 %, Asia-Pacífico 28 %, Oriente Medio y África 13 %, Norteamérica 2 % y Sur y Centroamérica 2 % (IRENA, 2020b).

En el caso de la mareomotriz potencial, aunque es la tecnología más madura, es también la de menor aporte energético mundial, puesto que requiere alta inversión de capital y su impacto ambiental es considerable. Todo esto la coloca fuera de las fuentes marinas con posibilidad de grandes desarrollos futuros (IRENA, 2020b).

El desarrollo actual en dispositivos de mareomotriz cinética incluye reducciones

de costos en instalación, operaciones y mantenimiento. Los buques especializados pueden ser más económicos que las embarcaciones utilizadas por la industria del petróleo y del gas, las cuales son más grandes, más sofisticadas y más caras (OES, 2017).

Los retos hoy en día para el desarrollo de tecnologías para hidrocinética marina incluyen: la capacidad de generar electricidad a partir de corrientes lentas, la distancia de la costa que suele ser grande y los movimientos estacionales de las corrientes oceánicas.

En el caso de la energía undimotriz comparada con la eólica terrestre, no hay una convergencia a un solo tipo de diseño de dispositivo, lo cual es respuesta a la búsqueda de posibilidades de extracción del recurso en zonas con potencial disponible bajo. En su mayoría, los dispositivos se encuentran en proyectos piloto y de demostración, con un avance importante que apunta al aumento en tamaño y potencia nominal, esperando alrededor de 100 MW instalados en los próximos años (IRENA, 2021b).

OTEC tiene el mayor potencial de recurso de las tecnologías marinas, siendo capaz de satisfacer las necesidades actuales de energía a nivel mundial. Puede proporcionar electricidad de carga base continua (sin problemas de intermitencia), lo que la convierte en una energía confiable comparada con las otras renovables. Por otro lado, puede combinarse con otras actividades económicas lo que la convierte en una de las renovables marinas más buscada. Sin embargo, se considera una tecnología todavía en fase de desarrollo puesto que sus eficiencias son bajas, con las plantas de demostración existentes en Estados Unidos y Japón. Por otro lado, hay una importante preocupación por los impactos ambientales que podrían causar la extracción masiva de aguas profundas alrededor de todo el mundo.

Las tecnologías de gradiente salino presentan requisitos geográficos que imponen

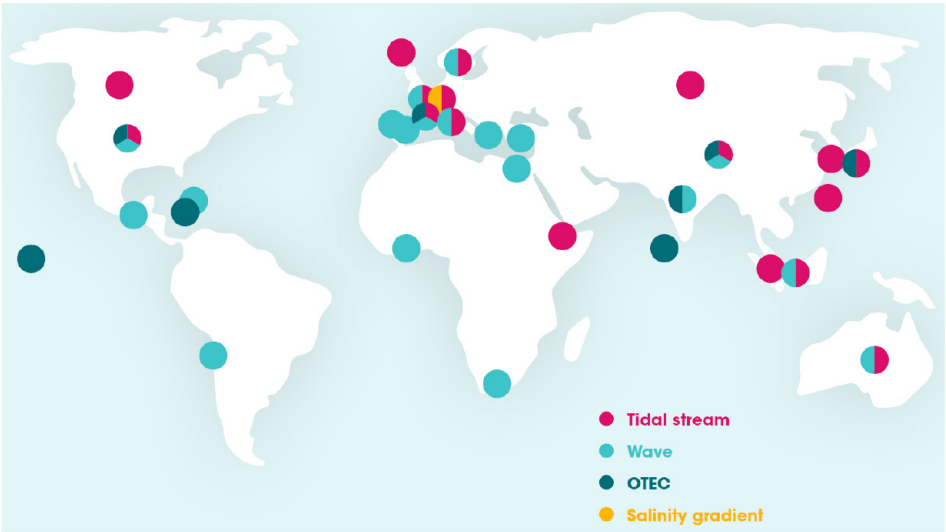

Figura 1. Distribución global de las actividades de energía marina (centrales eléctricas activas y proyectadas), (Fuente: base de datos de energía oceánica IRENA, (IRENA 2020b)

grandes limitaciones al potencial en general. Aunque es la tecnología menos madura de todas, con una sola planta piloto de 50 kW en los Países Bajos, es también una de las más dinámicas en investigación y desarrollo en la década más reciente. En esta tecnología se estudia también la posibilidad de utilizar desechos de salmuera de otras industrias para incrementar la densidad de energía disponible.

Aunque la mayoría de las tecnologías de energía marina se encuentran en las etapas tempranas de desarrollo, un número cada vez mayor de empresas, institutos de investigación, universidades e inversores están mostrando interés en las tecnologías de energía marina y están asignando recursos para seguir desarrollándolas y aumentar la capacidad instalada en los próximos años (IRENA, 2021b).

La clave para el desarrollo a mediano plazo es abordar los desafíos clave y acercarse a la comercialización de manera competitiva. Los ingresos y el apoyo de capital siguen siendo cruciales, ya que los costos de las tecnologías de energía marina aún son demasiado altos para competir con otras tecnologías de generación de energía renovable (IRENA, 2021a). En la Figura 1 se observa la distribución global de las diferentes energías marinas, tanto las activas como las proyectadas en próximos años. A la fecha, la energía eólica marina es prácticamente la única que ya está siendo comercializada (IRENA, 2020b).

La energía renovable marina tiene que enfrentar condiciones ambientales adversas y en áreas con redes eléctricas casi inexistentes. Esto corresponde a altos costos de capital y precios de la electricidad. Las limitadas cadenas de suministro establecidas y la competitividad de bajo costo con otras fuentes de energía renovable maduras, además de la falta de marcos regulatorios y de inclusión en las políticas nacionales, crean una brecha para la comercialización. Tales barreras tienen efectos adversos en la conciencia social de las energías renovables en alta mar, lo que da forma tanto al público como a la confianza de los inversores en estas tecnologías.

Más allá de las necesidades tecnológicas para la implementación de las energías marinas y lo que a ello corresponde, es necesario también traer a este análisis la importancia de los huecos del conocimiento respecto a los daños ambientales de una tecnología que actualmente se encuentra en desarrollo o pruebas. Muchos de los desarrollos actuales cuentan con los estudios ambientales del dispositivo en prueba, sin embargo, no se pretende el uso único de ese dispositivo y es la suma de ellos alrededor del mundo el impacto que debemos ser capaces de predecir en los próximos años.

Las energías marinas en México

En México, hasta el año 2011 se generaban 254.7 TWh/año, de los cuales el 81.24 % provenían de combustibles fósiles (gas natural, carbón y petróleo), 12.84 % de hidroeléctricas, 3.58 % de energía nuclear y sólo el 2.4 % a energías renovables (geotérmicas, solar, eólica, biocombustibles y otros), (Ramos Gutiérrez y Montelongo Fragoso 2012). En el año 2013 la generación a partir de energías renovables alcanzó el 23 % incluida la energía hidroeléctrica, (estimaciones de ProMéxico con datos de la Comisión Reguladora de Energía, CRE y la Comisión Federal de Electricidad, CFE).

México es un país con una localización geográfica privilegiada. En el caso de las mareas y el oleaje, el potencial energético es bajo, sin embargo, sí es posible su explotación adaptando y/o desarrollando la tecnología necesaria. En los casos de gradientes térmicos y salinos, México se encuentra geográficamente situado en una región estratégica para su explotación. De estas últimas, se cree que el potencial es de uno o dos órdenes de magnitud superior con respecto al oleaje. Se espera que México, en las próximas décadas, pueda cubrir las necesidades de generación eléctrica en regiones costeras, sin olvidar las características propias de nuestro país como la ocurrencia de huracanes, tsunamis y otros eventos extremos.

Marco legislativo nacional

En México, el marco legislativo respecto a las energías renovables comienza en el año 2008, cuando se aprueba la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE). A partir de su publicación, el gobierno decide aumentar la asignación de recursos públicos y privados para la investigación, desarrollo e innovación en energías renovables. Dicha ley, erogada en 2012, conformó instrumentos de planeación y financiamiento para tecnologías de conversión de las energías renovables encaminadas a cubrir, a mediano y largo plazo, las necesidades energéticas reales y urgentes del país. Buscaba que la generación basada en energías renovables creciera un 6.8 % anual, con prospección de alcanzar el 37.7 % de participación en generación total en 2030 (INEEL, 2016; SENER, 2018).

En el año 2015, se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Ley de Transición Energética (LTE), que actualmente rige las pautas en materia de energía. En la LTE se retoma la importancia de establecer metas para satisfacer el consumo energético nacional, incluyendo Energías Limpias, y sus alcances se establecen en la Ley General de Cambio Climático; esta ley señala que en el año 2020 la Secretaría de Energía y la Comisión Reguladora de Energía, deberían tener un sistema de incentivos que promuevan la generación de electricidad con energías renovables. Fijando así la meta de participación máxima de combustibles fósiles de 65% en 2024, 60 % en 2035 y 50 % en 2050 (DOF, 2018; Estrada *et al.,* 2013). La OES menciona que se estima que la energía marina pueda aportar entre 500 a 1000 MW de capacidad instalada para el año 2030 (OES *n.d.*).

Bajo este esquema, se crearon los Fondos Sectoriales de Energía, para "impulsar la investigación científica y tecnológica aplicada, así como la adopción, innovación, asimilación y desarrollo tecnológico, y la formación de recursos naturales especializados". En particular el Fondo Sectorial

conacyt-sener-Sustentabilidad Energética se enfocaría en "eficiencia energética, energías renovables, uso de tecnologías limpias y diversificación de fuentes primarias de energía" (sener, 2015). Bajo este marco, se conformaron los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (cemie), y, en particular, en el año 2017 inició operaciones el cemie-Océano, con el objetivo de desarrollar, promocionar y aprovechar sinergias mediante alianzas estratégicas multidisciplinarias participativas y dinámicas para el aprovechamiento sustentable de energía y abatir las barreras y retos científicos-tecnológicos del país (sener *n.d.*; cemie-Océano *n.d.*). El fondo se cerró en 2021 de acuerdo con las políticas nacionales, y actualmente no existen programas de financiación pública para continuar con la investigación y el desarrollo (oes *n.d.*).

Por otro lado, es importante mencionar que no existe una política clara del Ordenamiento del Espacio Marino, sólo se cuenta con los siguientes instrumentos legales: la Constitución Mexicana (artículo 27), la Ley General de Bienes Nacionales, la Ley Federal del Mar y la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Las autoridades involucradas de acuerdo al marco legal son: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (semarnat), Secretaría de Energía (sener), Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (conuee), Comisión Reguladora de Energía (cre), Comisión Federal de Energía (cfe), Comisión Nacional del Agua (conagua) y Secretaría de Comunicaciones y Transportes (sct).

Avances nacionales en materia de energías marinas

En los últimos 4 años la investigación y trabajos tecnológicos para el desarrollo de energías marinas en México, se han concentrado en el proyecto cemie-Océano, el cual conjunta los esfuerzos de 42 instituciones a lo largo de la República Mexicana, que van desde centros de investigación, universidades e industria privada; también colaboran con universidades, centros de investigación y agencias internacionales (cemie Océano *n.d.*).

Los trabajos se han desarrollado en diferentes líneas de proyección: 1) Evaluación de disponibilidad energética y caracterización de los potenciales marinos de la República Mexicana, 2) Estudios de potencial energético y ambientales en sitios de posible extracción, 3) Desarrollo tecnológico de dispositivos acordes a las condiciones mexicanas, 4) Estudios asociados a los desarrollos tecnológicos propuestos en materia de modificaciones e impactos al ambiente circundante y resistencia a condiciones extremas, 5) Materiales para evitar la corrosión, 6) Interconexión eléctrica e instrumentación, 7) Generación de patentes y 8) Creación de recursos humanos especializados en temas de energías marinas.

Potenciales energéticos

Actualmente, se cuenta con bases de datos del potencial energético para oleaje (condiciones medias y extremas), corrientes marinas, corrientes de marea, gradiente térmico y gradiente salino; con análisis de temporalidad y frecuencia (figura 2). Los resultados esperados de estos trabajos son atlas para cada tipo de energía. Con esta información fue posible realizar un primer tamiz que definiera posibles sitios de extracción, permitiendo la realización de estudios a menor escala.

En el caso del oleaje se cuenta con estudios de potencial energético al sur de Tamaulipas, Veracruz, Bahía Todos Santos, Baja California, Manzanillo y Yucatán. Se

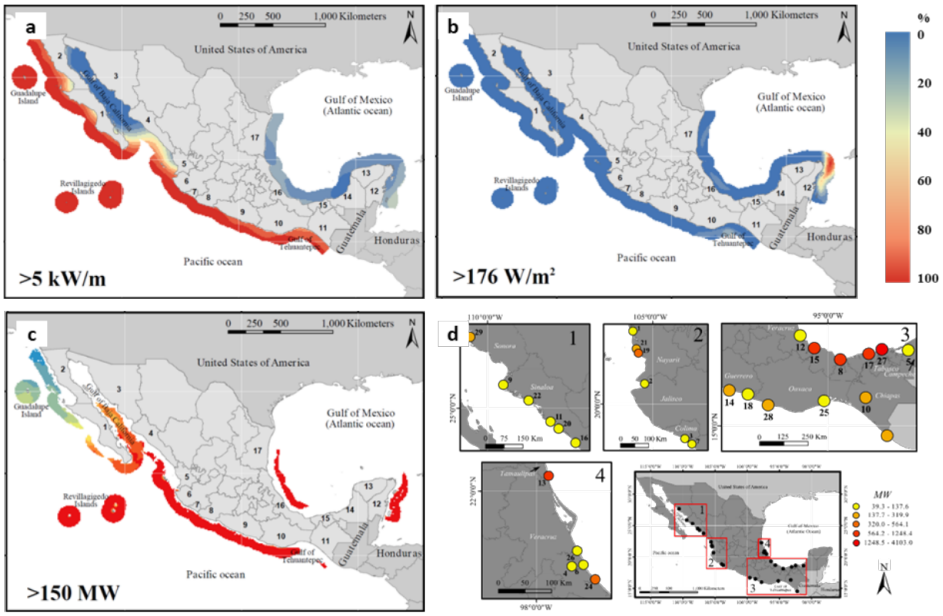

Figura 2. Potenciales teóricos de energías del océano en México: a) oleaje, b) corrientes, c) gradiente térmico, d) gradiente salino. Modificado de (Hernández-Fontes *et al.,* 2019b).

estima que la potencia extraída podría ser en algunas zonas de la costa occidental de México de 10 kW/m al menos 50% del tiempo; en zonas como Tamaulipas esta potencia varía entre 5 kW/m y 10 kW/m con una persistencia de 50-70 % en el intervalo del tiempo.

En el caso de las corrientes marinas se has distinguido lo estudios en la región del Caribe, por la Corriente del Golfo, que sufre un estrechamiento al pasar entre el continente y la isla Cozumel, la potencia de las corrientes oceánicas con una persistencia mayor 50 % del tiempo varía entre 176 y 512 W/m². Por otro lado, están las corrientes de marea y los estudios numéricos se han centrado en el golfo de California, donde además por su importancia en descarga de sedimentos del río bravo, se realizaron estudios hidro-sedimentarios.

En particular, para el gradiente térmico, definidos los sitios de interés se colocaron termistores para obtener una base de datos actualizada. Los mejores lugares en México para extraer energía térmica son las aguas profundas cercanas a las costas de Jalisco, Colima, Nayarit, Oaxaca y Baja California Sur, con una potencia disponible entre 150 y 200 MW en más del 70 % del tiempo.

Por otra parte, el sitio con mayor capacidad de potencia para extraer energía de gradientes salinos es el río Usumacinta con 4.1±0.7 GW. Recientemente, con base en las variaciones regionales y locales anuales del gasto medio del río Pánuco entre 1972 y 2019, se ha estimado que el valor promedio de la máxima potencia eléctrica extraíble es 0.9±0.4 GW.

Dispositivos de generación y nuevas tecnologías

Los resultados obtenidos en el CEMIE-Océano en tecnología se centran en el desarrollo de dispositivos y prototipos de extracción energética marina, materiales que eviten su corrosión, anclajes y distribución de la electricidad; estos desarrollos están enfocados al funcionamiento de las condiciones que se presentan en nuestro país. En la rabla 1, se puede observar que se cuenta con dispositivos y prototipos para todos los tipos de

Tabla 1. Dispositivos, prototipos y patentes obtenidos en los trabajos del CEMIE-Océano (EO, extracción de oleaje; ECO, extracción de corrientes marinas; EC, extracción de corrientes; EGS, Extracción de gradiente Salino; Extracción de gradiente térmico; AD, Anclaje de dispositivos; PC, Protección a la corrosión); DE, Distribución de energía.

Función	Nombre	Tipo de tecnología	TRL
EO	CEO-PSG (Figura 3a)	Dispositivo	3
EO	CEO-PAF	Dispositivo	4
EO	CEO-Boya	Dispositivo	3
EO	WEC CINVESTAV, Mérida (Figura 3b)	Dispositivo	3
EO	WEC CGG	Dispositivo	4
EO	WEC CICESE	Prototipo	2
EC	CEC	Dispositivo	5
EO	OWC con turbina Wells (Figura 3c)	Prototipo	2
EO	WEC-Flotador-pedestal DINA V3	Prototipo	2
ECO	Hidrogenerador HYPA (Figura 3d)	Dispositivo	4
ECO	Turbina de baja velocidad con amplificador (Figura 3e)	Prototipo	2
EGT	Planta OTEC 1kw (Figura 3f)	Prototipo	3
EGS	Celda de gradiente salino (Figura 3g)	Prototipo	3
EGS	Planta generadora de energía a partir de gradiente salino.	Prototipo	3
AD	Soporte ecológico de estructuras marinas	Patente solicitada	5
PC	Sistema de protección catódica	--	7
DE	Modelo en pequeña escala de integración a la red y almacenamiento basado en electrónica de potencia	Prototipo	3
DE	Inversor de potencia	--	4
PC	Recubrimiento pmma – nanopartículas (polimetilmetacrilato- SiO2)	--	4
PC	recubrimientos súper-hidro-fóbicos y súper- hidrofílicos	Patente solicitada	5
PC	Pastas de nitruración	Patente solicitada	5
EGS	Membranas de intercambio iónico y protónico de biomateriales	Prototipo	5
EGS	Proceso para obtención de grafeno	Patente en proceso	5
PC	recubrimientos superhidrofóbicos	Patente en proceso	
PC	Cemento tipo portland, y concretos resistentes al ambiente marino	Patente solicitada	5

energías del océano, en el caso de oleaje y corrientes en diferentes procesos de avance, algunos con pruebas en laboratorio y otros con sus primeras pruebas en campo. Imágenes de algunos de estos dispositivos se muestran en la figura 3.

Asociado a dispositivos y prototipos, se han realizado los siguientes estudios de modelado numérico: hidrodinámica de las zonas donde se pretende su colocación y efectos en la morfodinámica costera por campos de WEC. En el caso de oleaje, también se ha evaluado la posibilidad de utilizar concentradores de energía que permitan el uso de dispositivos más maduros, o generar zonas de extracción donde el potencial parece pequeño.

Los casos particulares de gradiente térmico y salino, se han estudiado también otras posibilidades de uso del agua que se utiliza en sus procesos, principalmente agua dulce en el caso de salino y agua fría para refrigeración en el caso de térmico.

Como se observa en la tabla 1, en estos años se han presentado grandes avances en materia de evitar la corrosión marina con

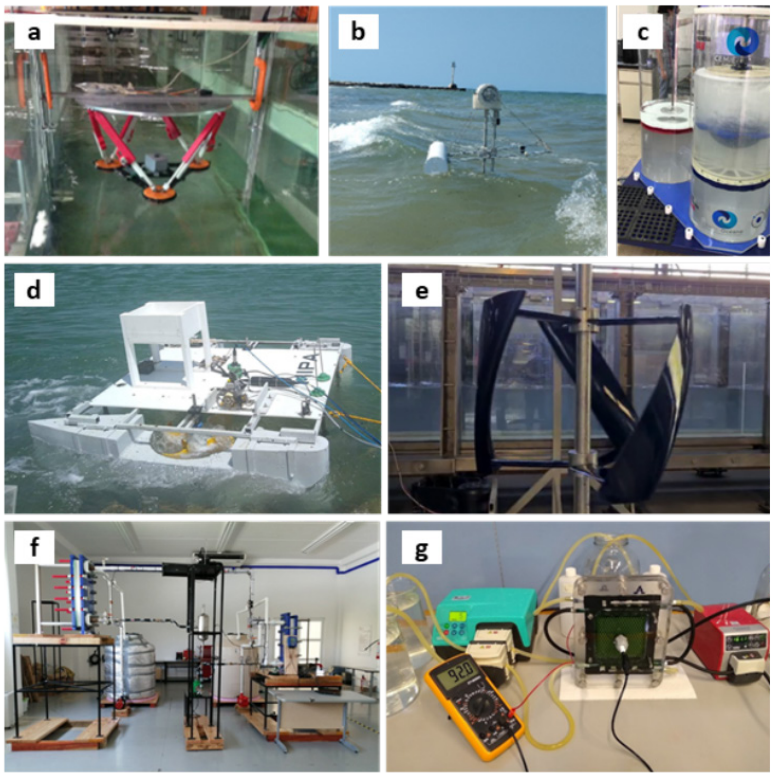

Figura 3. Algunos prototipos desarrollados por diferentes instituciones participantes del CEMIE-Océano: a) CEO-PSG, CICESE; b) WEC CINVESTAV Mérida; c) OWC con turbina Wells, IIUNAM, ICF-UNAM; d) Hidrogenerador HYPA, IIUNAM-Sisal; e) Turbina de baja velocidad con amplificador, IIUNAM; f) Planta OTEC 1kw, UNICARIBE, UNAM y UABCS; g) Celda de gradiente salino, IIUNAM. Imágenes propiedad del CEMIE-Océano.

diferentes tipos de recubrimientos. Así como también se ha trabajado en nuevos desarrollos de membranas para gradiente salino a un mejor precio y con un mayor rendimiento.

Otro detalle importante en es que los dispositivos cuenten con la instrumentación adecuada, en principio para mediciones en campo, para su caracterización y finalmente para su funcionamiento final trabajando en el campo. Este tipo de trabajos se ha realizado con algunos dispositivos WEC. Trabajos que han ido de la mano con el desarrollo de un laboratorio natural que se localizara al no

Ambiental y social

Como se mencionó en el apartado anterior, hay poca información alrededor del mundo concerniente a los impactos que la extracción de este tipo de energía ocasiona, sin embargo, eso no es una limitante para proponer indicadores y líneas de investigación que permitan ir abriendo paso para la creación de normatividad que permita una explotación responsable del recurso. Como un primer trabajo para la realización de impacto ambiental es conocer el estado anterior al desarrollo de interés.

Para cumplir con lo anterior se han generado trabajos en:

- Caracterizar los elementos más relevantes para el funcionamiento de ecosistemas focales.
- Evaluación que permita establecer índices de afectación ecológica de tecnologías de aprovechamiento energético para la determinación relativa de la huella ecológica marina y en ecosistemas costeros.
- Diagnóstico ecológico que se combinará con el diagnóstico energético para determinar, la ubicación óptima para la generación de energía alternativa en la zona costera y el mar.
- Recomendaciones y medidas para mitigar el efecto potencial de las instalaciones generadoras de energía oceánica, en relación con el funcionamiento e integridad de los ecosistemas costeros.
- Recomendaciones sobre medidas de mitigación en cuanto al efecto potencial de las instalaciones generadoras de energía sobre la distribución y abundancia de mamíferos marinos.
- Desarrollar y gestionar una base de datos de ciclo de vida para las tecnologías de generación y almacenamiento de energía del océano.
- Identificar localidades con características geológicas resistentes y estables para la instalación de las estructuras de los prototipos de generación de energía marina propuestos.
- Desarrollar el análisis espacial de los factores abióticos (geología y relieve) y bióticos (cobertura vegetal costera) involucrados, con vistas a seleccionar los sitios idóneos para el emplazamiento industrial.
- Evaluación de impactos potenciales de las plantas energéticas a los ecosistemas.
- Identificar las áreas más biodiversas de vegetación costera para planear la instalación de plantas generadoras de energía marina en sitios con menor riesgo de efectos sobre la biodiversidad.
- Índice de vulnerabilidad ante el cambio climático en las zonas costeras del país.

Desde la parte ambiental se han generado bases de datos con información ambiental de sitios de Interés como son Isla Todos Santos, B C, Manzanillo, Colima, isla Cozumel, Quintana Roo, islas Marías; Nayarit, bahía Banderas, Nayarit y Jalisco, Pto. Angel, Oaxaca, La Paz BC, río Tuxpan,

esteros Tumilco y Jacome, Veracruz, laguna de la Mancha, Veracruz-Tabasco y río Lagartos, Yucatán. Se cuenta con información de fitoplancton, vertebrados terrestres y anfibios (zona costera). Además, se han realizado de propuestas de metodologías de evaluación del impacto ambiental (Mendoza *et al.,* 2019; Martínez *et al.,* 2021; Felix *et al.,* 2019). La figura 4 muestra los elementos sugeridos para el análisis sistemático de impactos ambientales de las energías marinas: estresores, impactos, receptores y respuestas.

Finalmente, la investigación del CEMIE-Océano sobre el aprovechamiento de la energía marina se ha dirigido hacia evaluaciones integrales de proyectos potenciales, por lo que, además de la evaluación técnica y de impacto ambiental, la percepción social y criterios socioeconómicos han sido incorporados en los estudios (por ejemplo, Garduño-Ruiz *et al.,* 2021; Marin-Coria *et al.,* 2021; Wojtarowski *et al.,* 2021, Ventura *et al.,* 2022).

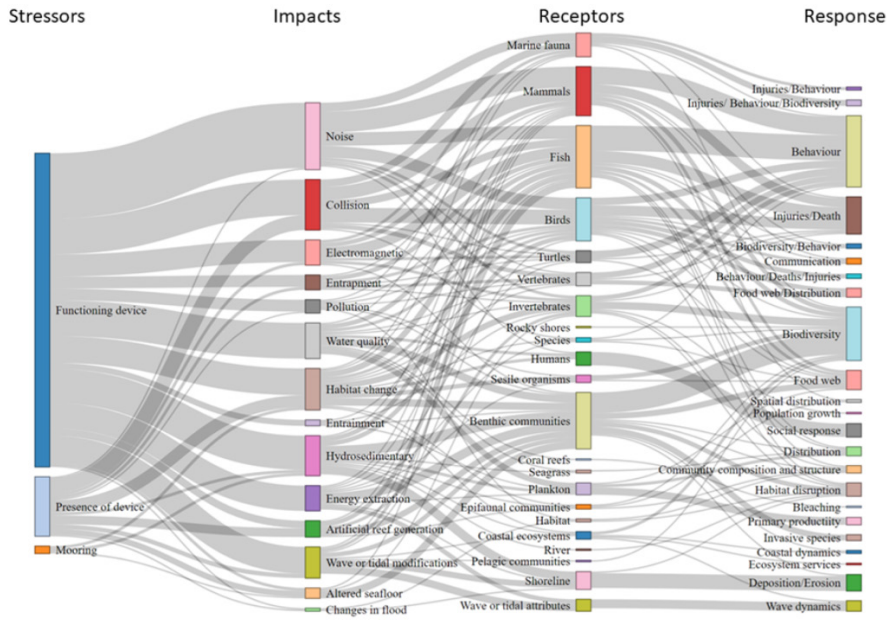

Figura 4. Análisis sistemático de impactos ambientales de las energías marinas, propuesto por investigadores del CEMIE-Océano. Imagen tomada de Martínez *et al.,* 2021.

Isla de Cozumel: un caso viable para el desarrollo de energías marinas en México

México presenta un gran interés en la conservación y desarrollo sustentable de sus zonas insulares, primero porque son ecosistemas que presentan mayores presiones antropogénicas y segundo porque se han convertido en áreas de refugio para especies marinas, costeras y terrestres, en ellas se presenta una mayor diversidad de especies y endemismos comparadas con el territorio continental (Aguirre Muñoz *et al.,* 2010). Para la isla de Cozumel, el CEMIE-Océano ha generado bases de datos de anfibios, reptiles, aves, vegetación en dunas, distribución de mamíferos marinos (avistamiento y acústica pasiva submarina), dunas (evaluación y su relación con los parámetros ambientales) (Heckel *et al.,* 2018; MacGregor *et al.,* 2020; Gómez *et al.,* 2021; Castillo-Campos *et al.,* 2021; de Almeida *et al.,* 2022; Castillo-Campos *et al.,* 2022).

Por otro lado, tenemos que las corrientes oceánicas que recorren el Canal de Cozumel en el mar Caribe mexicano han sido objeto de estudio del CEMIE-O, que lo ha nombrado como sitio clave y zona piloto para instalar un dispositivo de aprovechamiento energético de este tipo. Hernández-Fontes *et al.,* (2019a), señalan que en esta zona es posible extraer energía para hidrocinéticos de baja velocidad durante aproximadamente el 50 % del tiempo, es en el mar Caribe donde serían posibles los niveles más altos y la extracción de energía casi permanente. Algunos trabajos del CEMIE-Océano que se han enfocado en el potencial teórico de las corrientes en el canal de Cozumel, así como en la factibilidad técnica, ambiental y social de su aprovechamiento son los de Alcérreca-Huerta *et al.* (2019), Bárcenas Graniel *et al.* (2021) y Wojtarowski (2020). Además, se ha identificado el potencial OTEC con el que cuenta y se ha analizado la factibilidad técnica-ambiental del aprovechamiento de la energía de gradiente térmico en Cozumel (Chan *et al.,* 2020; Tobal-Cupul *et al.,* 2022).

La isla de Cozumel, no sólo es un recurso estratégico en materia de lo ambiental y lo energético, también es un destino turístico importante a nivel internacional. En la actualidad, las principales actividades turísticas que se desarrollan son esnórquel, buceo, recorridos en embarcaciones no motorizadas, veleros, kayak, canoas; en tierra, senderismo interpretativo, fotografía de la naturaleza, recorridos turísticos en vehículos terrestres y la observación de aves (SEMARNAT y CONANP, 2016). En el ámbito social, la conservación del área protegida significa que cooperativas pesqueras, pescadores independientes, artesanos, cooperativas turísticas, prestadores de servicios náutico recreativos y pobladores en general conserven sus medios de subsistencia, recreación y calidad de vida (SEMARNAT y CONANP, 2016).

Las actividades económicas de la Isla se centran en el turismo, que llega por crucero (internacional) o ferry (nacional). Después de los paros económicos y de actividades que se dieron por la pandemia del COVID-19, Cozumel renovó actividades en agosto del 2021 y llegó a registrar en diciembre del mismo año, un arribo de 7 cruceros al día con aproximadamente 6 000 pasajeros (Carrión, 2021). La Cozumel no cuenta con industria, por lo que debe traerse de continente los bienes y alimentos necesarios para llevar a cabo sus actividades económicas y sociales, entre ellos la energía.

Referncias

Aguirre Muñoz, Alfonso, Juan . Bezaury- Creel, Horacio De la Cueva, E. March-Mifsut, Eduardo Peters-Recagno, Susana Rojas-González de Castilla, and Karina Santos-del Prado Gasca. 2010. "Islas de México. Un Recurso Estratégico," 48.

Alcérreca-Huerta, Juan Carlos, Job Immanuel Encarnacion, Stephanie Ordoñez-Sánchez, Mariana Callejas-Jiménez, Gabriel Gallegos Diez Barroso, Matthew Allmark, Ismael Mariño-Tapia, Rodolfo Silva Casarín, Tim O'Doherty, Cameron Johnstone, and Laura Carrillo. 2019. Energy Yield Assessment from Ocean Currents in the Insular Shelf of Cozumel Island. *Journal of Marine Science and Engineering,* 7 (5):147. doi: 10.3390/jmse7050147.

AWE. 2020. About Airborne Wind Energy – Airborne Wind Europe." 2020. https://airbornewindeurope.org/about-airborne-wind-energy.

Bárcenas Graniel, Juan F, Jassiel VH Fontes, Hector F Gomez Garcia, and Rodolfo Silva. 2021. "Assessing Hydrokinetic Energy in the Mexican Caribbean: A Case Study in the Cozumel Channel. *Energies,* 14 (15):4411.

Carrión, Karina. 2021. Cozumel Rompe Récord Con El Arribo de Siete Cruceros En Un Día - PorEsto. December 7, 2021. https://www.poresto.net/quintana-roo/2021/12/7/cozumel-rompe-record-con-el-arribo-de-siete-cruceros-en-un-dia-304095.html.

Castillo-Campos, Gonzalo, José G García-Franco, and M Luisa Martínez. 2021. First record of naturalization of Scaevola taccada (Gaertn.) Roxb.(Goodeniaceae) in southeastern Mexico. *BioInvasions Record,* 10 (2).

Castillo-Campos, Gonzalo, M Luisa Martínez, José G García-Franco, Gabriela Vázquez, Octavio Pérez-Maqueo, and Jesús Pale-Pale. 2022. Assessing the impact of an invasive plant in a Protected Natural Area: Island of Cozumel, Mexico. *Biological Invasions*: 1-16.

CEMIE Océano. n.d. "CEMIE Océano." Accessed March 13, 2022. https://cemieoceano.mx/.

Chan, Enrique Celestino Carrera, María Fernanda Sabido Tun, Juan Francisco Bárcenas Graniel, and Estela Cerezo Acevedo. 2020. Environmental Impact Assessment of the Operation of an Open Cycle OTEC 1MWe Power Plant in the Cozumel Island, Mexico. Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC):145.

CMNUCC. 1997. Protocolo de Kyoto. In , edited by United Nations Framewor Convention on Climate Change. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/l07a01.pdf#page=24.

de Almeida, Laura R, R. Silva, and M L. Martínez. 2022. The relationships between environmental conditions and parallel ecosystems on the coastal dunes of the Mexican Caribbean. *Geomorphology,* 397:108006.

DOF. 2018. DECRETO Por El Que Se Reforman y Adicionan Diversas Disposiciones de La Ley General de Cambio Climático. CDMX: Honorable Congreso de la Unión. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5531463&fecha=13/07/2018.

Energía Estratégica. 2021. Quintana Roo Con Proyectos Fotovoltaicos, Eólicos y de Biomasa - Energía Estratégica. March 2, 2021. https://www.energiaestrategica.com/quintana-roo-con-proyectos-fotovoltaicos-eolicos-y-de-biomasa/.

ENS. n.d. L'envasement de l'estuaire - Département de Géographie de l'ENS. Accessed March 13, 2022. https://www.geographie.ens.fr/L-envasement-de-l-estuaire.html?lang=en.

Estrada, J., J. Hernández, J. Ontiveros, F. Rodríguez, Erika Jaime, Al. Ubaldo, and Israel Chavarría. 2013. Prospectiva Del Sector Eléctrico 2013-2027, 1–230. http://www.sener.gob.mx/res/pe_y_dt/pub/2013/prospectiva_del_sector_electrico_2013-2027.pdf.

Felix, A., J. V. Hernández-Fontes, D. Lithgow, E. Mendoza, G. Posada, M. Ring, y R. Silva. 2019. Wave Energy in Tropical Regions: Deployment Challenges, Environmental and Social Perspectives. *Journal of Marine Science and Engineering,* 7 (7). https://doi.org/10.3390/jmse7070219.

Garduño-Ruiz, E. P., R. Silva, Y. Rodríguez-Cueto, A. García-Huante, J. Olmedo-González, M L. Martínez, A. Wojtarowski, R. Martell-Dubois, y S. Cerdeira-Estrada. 2021. Criteria for optimal site selection for ocean thermal energy conversion (Otec) plants in Mexico. *Energies* 14 (8):2121.

Golroodbari, S. Zahra, y Wilfried van Sark. 2020. Simulation of Performance Differences between Offshore and Land-Based Photovoltaic Systems. *Progress in Photovoltaics: Research*

and Applications 28 (9): 873–86. https://doi.org/10.1002/pip.3276.

Gómez, Carlos Francisco Rodríguez, Vanesa Papiol, Ismael Mariño Tapia, Gabriela Vázquez, and Cecilia Enríquez. 2021. "Fitoplancton y Variación Ambiental en un Área con Potencial de Obtención de Energía Marina: el Caso de Cozumel." 1er Congreso CEMIE-Océano.

Hanley Steve. 2021. Vestas Unveils World's Most Powerful Offshore Wind Turbine - CleanTechnica. February 12, 2021. https://cleantechnica.com/2021/02/12/vestas-unveils-worlds-most-powerful-offshore-wind-turbine/.

Heckel, G., M.G. Ruiz Mar, Y. Schramm y U. Gorter, . 2018. Atlas de Distribución y Abundancia de Mamíferos Marinos en México. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche.

Hemer, Mark A., Richard Manasseh, Kathleen L. McInnes, Irene Penesis, and Tracey Pitman. 2018. Perspectives on a Way Forward for Ocean Renewable Energy in Australia. *Renewable Energy,* 127: 733–45. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.036.

Hernández-Fontes, J. V., A. Felix, E. Mendoza, Yandy Rodríguez Cueto, y R. 2019a. On the Marine Energy Resources of Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering,* 7 (6). https://doi.org/10.3390/jmse7060191.

Hernández-Fontes, J. V., A. Felix, E. Mendoza, Yandy Rodríguez Cueto, y R. . 2019b. On the Marine Energy Resources of Mexico. Journal of Marine Science and Engineering 7 (6): 191. https://doi.org/10.3390/jmse7060191.

Hill, Joshua S. 2017. E.ON Invests in Innovative Drone-Based Airborne Wind Energy | RenewEconomy. March 12, 2017. https://reneweconomy.com.au/e-invests-innovative-drone-based-airborne-wind-energy-73612.

Huckerby, J., Jeffrey, H., de Andres y A. and Finlay, L. 2017. Una Visión Internacional Para La Energía Oceánica, 2017. Edited by Ana Brito e Melo and José Luis Villate. III.

INEEL. 2016. Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. 2016. https://www.ineel.mx/cemie-oceano.html.

IPCC. 2021. Español — IPCC. 2021. https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/.

IRENA. 2019. Future of Wind: Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-Economic Aspects. International Renewable Energy Agency (IRENA). https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Oct/IRENA_Future_of_wind_2019.pdf.

IRENA. 2020a. Fostering A Blue Economy, Offshore Renewable Energy. The International Renewable Energy Agency.

IRENA. 2020b. Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies. International Renewable Energy Agency.

IRENA. 2021a. "International Renewable Energy Agency." 2021. https://doi.org/10.18356/9789210056755c212.

IRENA. 2021b. Offshore Renewables: An Action Agenda for Deployment.

López, J., R. Silva, y E. Mendoza. 2011. "Aprovechamiento de La Energía de Las Corrientes Con El Hidrogenerador IMPULSA." *Tecnologia y Ciencias del Agua,* II: 97–110.

Marin-Coria, Etzaguery, Rodolfo Silva, Cecilia Enriquez, M. Luisa Martínez, and Edgar Mendoza. Environmental Assessment of the Impacts and Benefits of a Salinity Gradient Energy Pilot Plant. *MDPI. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, June 3, 2021. https://www.mdpi.com/1996-1073/14/11/3252.

Martínez, M. L., G. Vázquez, O. Pérez-Maqueo, R. Silva, P. Moreno-Casasola, G. Mendoza-González, J. López-Portillo, *et al.* 2021. A Systemic View of Potential Environmental Impacts of Ocean Energy Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 149 (June). https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111332.

MacGregor Fors, I., Gómez Martínez M.A., García Arroyo M., Vázquez L.-B., Vázquez-Domínguez E., Valenzuela-Galván D. 2020. Aves de la Tierra de las Golondrinas: Isla de Cozumel. . Campeche: CEMIE-Océano, Universidad Autónoma de Campeche.

Mendoza, Edgar, Debora Lithgow, Pamela Flores, Angélica Felix, Teresa Simas, and Rodolfo Silva. 2019. A Framework to Evaluate the Environmental Impact of OCEAN Energy Devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 112 (September): 440–49. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.05.060.

Mørk, Gunnar, Stephen Barstow, Alina Kabuth, and M. Teresa Pontes. 2010. Assessing the Global Wave Energy Potential. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE 3 (January): 447–54. https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20473.

Nihous, G. C. 2007. A Preliminary Assessment of Ocean Thermal Energy Conversion Resources. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME,* 129 (1): 10–17. https://doi.org/10.1115/1.2424965.

OES. n.d. OES | Country Info | Mexico. Accessed March 14, 2022. https://www.ocean-energy-systems.org/ocean-energy-in-the-world/mexico/.

OES. 2017. "An International Vision for Ocean Energy."

Ramos Gutiérrez, L. J. y M. Montelongo Fragoso. 2012. Generation of Electric Energy in Mexico. *Tecnologia y Ciencias Del Agua* ,3 (4): 1–15.

SEMARNAT, and CONANP. 2016. Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna La Porción Norte y La Franja Costera Oriental, Terrestres y Marinas de La Isla de Cozumel. México. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/32_libro_pm.pdf.

SENER. n.d. "Centros Mexicanos de Innovación En Energía | Secretaría de Energía | Gobierno | Gob.Mx." Accessed March 13, 2022. https://www.gob.mx/sener/articulos/centros-mexicanos-de-innovacion-en-energia.

SENER. 2015. Fondos Sectoriales de Energía | Secretaría de Energía | Gobierno | Gob.Mx. July 20, 2015. https://www.gob.mx/sener/articulos/fondos-sectoriales-de-energia-8387?state=published.

SENER. 2018. Prospectivas de Energías Renovables (2018-2032). Secretaria de Energía. https://www.gob.mx/sener.

Skråmestø, Øystein S ØS, SE Stein Erik Skilhagen, and Werner Kofod WK Nielsen. 2009. Power Production Based on Osmotic Pressure. Waterpower XVI, 1–10. http://www.sheliaksystem.com/Osmotic_Power_Domain/Waterpower_XVI_-_Power_production_based_on_osmotic_pressure_tcm9-5100.pdf.

Speer, Lisa. n.d. A New Regime for the High Seas - Ocean Unite. Accessed March 13, 2022. https://www.oceanunite.org/new-regime-high-seas/.

TETHYS. n.d. Annapolis Tidal Station | Tethys. Accessed March 13, 2022. https://tethys.pnnl.gov/project-sites/annapolis-tidal-station.

Tobal-Cupul, J. G., E. Paola Garduño-Ruiz, Emiliano Gorr-Pozzi, J. Olmedo-González, E.D. Martínez, A. Rosales, D. D. Navarro-Moreno, J. E. Benítez-Gallardo, F. García-Vega, y M. Wang. 2022. An Assessment of the Financial Feasibility of an OTEC Ecopark: A Case Study at Cozumel Island. Sustainability 14 (8):4654.

UNFCCC. 2021a. "¿Qué Es El Protocolo de Kyoto? | CMNUCC." 2021. https://unfccc.int/es/kyoto_protocol.

UNFCCC. 2021b. Conferencia de Las Partes (COP) | CMNUCC. 2021. https://unfccc.int/es/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop.

UNFCCC. 2021c. El Acuerdo de París | CMNUCC. 2021. https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris.

UNFCCC. 2021d. IRENA y ONU Cambio Climático Se Unen Para Acelerar El Uso de Renovables Como Solución Climática | CMNUCC. 2021. https://unfccc.int/es/news/irena-y-onu-cambio-climatico-se-unen-para-acelerar-el-uso-de-renovables-como-solucion-climatica.

UNFCCC. 2021e. What Is the United Nations Framework Convention on Climate Change? | UNFCCC. 2021. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change.

United Nations. 2017. Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible - Desarrollo Sostenible. Web Page. 2017. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/.

Vázquez, Jesus. 20015. Promueven Energía Mareomotriz En Cozumel | El Economista. El Economista. July 19, 20015. https://www.eleconomista.com.mx/estados/Promueven-energia-mareomotriz-en-Cozumel-20150719-0028.html.

Ventura, Yudisleyvis, Y. Rodríguez, I. Odériz, V.Chávez, N.o Mori, A. Felix, S. Cerdeira-Estrada, y R. Silva. 2022. New Assessment of Wave Energy in Relation to Geomorphological and Demographic Characteristics on the Pacific Coast of Baja California, Mexico. *Frontiers in Marine Science* ,9. doi: 10.3389/fmars.2022.872707.

White & Case. 2019. Offshore Wind Projects: Assessing the Environmental Impact.

Wojtarowski, A. 2020. ¿Podrá Cozumel capitalizar su potencial para el desarrollo de energía marina? Un análisis desde la actitud sobre energías alternativas. *Intersticios. Revista Sociológica de Pensamiento Crítico* 14 (1):31-58.