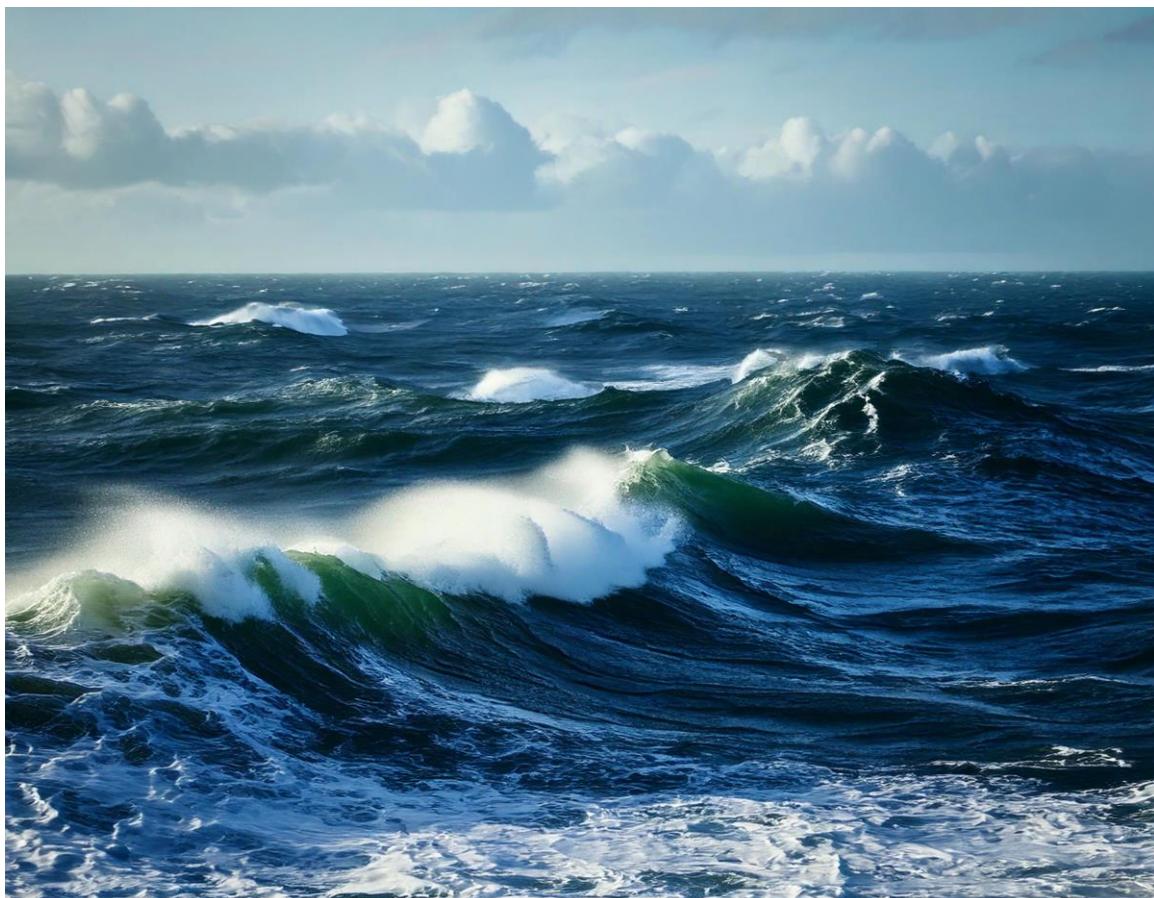


**INFORME DE LA RED REMAR DE INTEGRACIÓN EN REDES
ELÉCTRICAS IBEROAMERICANAS DE LAS ENERGÍAS DEL MAR**

**LAS ENERGÍAS DEL MAR
EN LOS PAÍSES
DE IBEROAMÉRICA**

Políticas, capacidades, recurso e integración en sus redes.



Diciembre 2024

Editorial Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.

**DOCUMENTO ENTREGABLE DE LA RED DE INTEGRACIÓN
EN REDES ELÉCTRICAS IBEROAMERICANAS DE LAS
ENERGÍAS DEL MAR**

**LAS
ENERGÍAS DEL MAR
EN LOS PAÍSES
DE IBEROAMÉRICA**

Políticas, capacidades, recurso e integración en sus redes.

Diciembre 2024

Editorial Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo

Primera edición, 2024

© de la primera edición:

Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). www.cyted.org

© Lista de autores – Institución y país

Marcos Lafoz Pastor (CIEMAT) - España

Isabel Villalba Cabrera (Universidad Las Palmas de Gran Canaria) - España

Adriana García Mendoza (PLOCAN)- España

Pablo Alejandro Haim (Universidad Tecnológica Nacional campus Buenos Aires) – Argentina.

Roberto Manuel Tula (Universidad Tecnológica Nacional campus Buenos Aires) – Argentina.

Ana Julia Lifschitz (Universidad Tecnológica Nacional campus Chubut) – Argentina.

Norma Cristofaro (Universidad Tecnológica Nacional campus Chubut) – Argentina.

Milad Shadman (Universidad Federal Rio de Janeiro) - Brasil

Thyago Estrabis (Universidad Federal Rio de Janeiro) – Brasil

Tania Arispe Angulo (Universidad Federal Itajubá)- Brasil

Germán Niño del Río (Universidad Federal Itajubá)- Brasil

Darwin Maestre (Universidad Federal Itajubá)– Brasil.

Gonzalo Tampier Brockhaus(Universidad Austral)–Chile

Nathalie Almonacid Valenzuela (MERIC) –Chile

Natalia Azares Aguayo (MERIC) – Chile

Andrés Fernando Osorio Arias(CEMARIN) – Colombia.

Rubén Darío Montoya Ramírez (Universidad de Medellín)– Colombia.

Aymer Maturana (Universidad del Norte)– Colombia.

William López Castrillón (Fundación Universidad de América) – Colombia.

Rodrigo Rojas Morales (Instituto Costarricense de la Energía) – Costa Rica

Melissa Piedra Lascarez (Universidad Nacional a Distancia)– Costa Rica

Félix Vladimir Roldán(Universidad de Oriente) – Cuba

Jesús Portilla Yandún (Escuela Politécnica Nacional)– Ecuador

Emérita Alexandra Delgado Plaza (Escuela Politécnica del Litoral –ESPOL)– Ecuador

Rubén José Paredes Alvarado (Escuela Politécnica del Litoral –ESPOL)– Ecuador

Juan Manuel Peralta Jaramillo (Escuela Politécnica del Litoral –ESPOL)– Ecuador

Danny Vinicio Ochoa Correa (Universidad de Cuenca) – Ecuador

Emiliano Gorr Pozzi (Universidad Autónoma de Baja California) – México

Héctor García Nava (Universidad Autónoma de Baja California)– México

Francisco Ocampo Torres (CICESE) – México

Arthur McCarty James Rivas (Universidad Tecnológica de Panamá)–Panamá

José Rodríguez Sánchez (Universidad Tecnológica de Panamá) –Panamá

Gustavo Omar Guarniz Avalos (Universidad Tecnológica del Perú) - Perú

Jorge L. Mirez Tarrillo (Universidad Nacional de Ingeniería) - Perú

Ana Brito e Melo (WavEC – Offshore Renewables)- Portugal

Rodrigo Alonso Hauser (Universidad de la República) – Uruguay

Rodolfo Pienika Archondo (Universidad de la República) – Uruguay

Juan Villemur Reyes (Universidad de la República) – Uruguay

ISBN: 978-84-15413-68-4

País de edición: España

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer especialmente al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), el cual ha creado el entorno para reunir a los mayores expertos en energías del mar de Iberoamérica para trabajar de manera conjunta en este proyecto de la Red REMAR.

En los últimos cuatro años hemos ido definiendo y afianzando los distintos grupos de trabajo, consiguiendo identificar a los actores clave que han sido capaces de organizarse para desarrollar un trabajo de búsqueda y síntesis de la información asociada a las energías del mar en sus países. Es por tanto el agradecimiento más especial de esta sección para estos investigadores e investigadoras.

También es momento de agradecer a las instituciones que han respaldado a todos estos investigadores para que puedan dedicar el tiempo necesario a esta actividad.

Esperamos que sea del agrado de todos.

Marcos Lafoz Pastor

Investigador Científico en el Centro de Investigadores Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)

Coordinador de la Red REMAR-CYTED



Fuente imagen: Elaboración propia.

PRÓLOGO

Sin lugar a dudas que se llevan a cabo esfuerzos concertados para avanzar en el desarrollo de estrategias para aprovechar la energía del mar en los países iberoamericanos, especialmente con actividades como las de la Red REMAR “Oportunidades de Integración en Redes Eléctricas Iberoamericanas de las Energías del Mar”. Por ejemplo, con esos esfuerzos concertados se ha identificado desarrollo en cierta forma desigual entre países y posiblemente se sugieren acciones para aproximarnos al equilibrio. Sin embargo, también es indispensable atender y sobre todo superar nuevos e importantes retos y desafíos.

Se identifica además que hemos abordado la evaluación del recurso disponible asociado a las diversas fuentes renovables de la energía del mar con lo que se obtiene un buen panorama regional. A partir de esos resultados se establecen características promedio de los procesos marinos tales como el oleaje, las corrientes de marea, las corrientes oceánicas, los gradientes térmicos y salinos, que pueden considerarse como fuentes importantes. El reto fundamental en estos aspectos es ahora la determinación de los recursos disponibles con escalas temporales y espaciales más finas, que permitan avanzar en la identificación de sitios específicos que sean clave para el desarrollo para la conversión de la energía que podría ser proporcionada por cada proceso en particular. Además, es de vital importancia el conocer la variabilidad temporal y espacial del fenómeno específico, y tener la capacidad de establecer tendencias de las variables dinámicas dominantes y la existencia de relaciones con índices que se asocian al clima y sus cambios, con el objetivo de considerar razonablemente su influencia en la vida útil de los dispositivos y en los planes para operaciones de instalación y mantenimiento a largo plazo.

Las cantidades moderadas de la energía en nuestros mares nos invita a reflexionar sobre las técnicas más apropiadas para la conversión, tal que probablemente nos enfrentamos a la necesidad de diseñar nuevas técnicas y hacer mejor uso de la persistencia del fenómeno y de la ausencia de valores extremos considerables, a comparación de esas cantidades en mares de las altas latitudes. Se promueve entonces avanzar en el conocimiento básico de los fenómenos de interés y la determinación y diseño de nuevos conceptos tecnológicos para la conversión de la energía que deseamos, lo que representa retos importantes. Además del conocimiento básico es indispensable contar con recursos humanos incorporados a diseño, análisis teórico, experimentos en el laboratorio y pruebas en el mar.

Una alternativa atractiva es el desarrollo de dispositivos convertidores de energía multipropósito. Por ejemplo, un grupo de convertidores de energía de las olas (CEO) puede funcionar también como modificador de los procesos costeros y por ende de la erosión y deposición de arena en las playas, inclusive con dispositivos CEO con dinámica propia y con la capacidad de reorientarse. Por otro lado, es también atractivo enfocar nuestros esfuerzos en el diseño y el desarrollo de dispositivos de la última generación que puedan ser utilizados para proporcionar energía en sitios aislados, pequeñas comunidades pesqueras e islas en donde no se tiene acceso a ninguna red eléctrica, de tal forma que se prefieren dispositivos modulares con los que se tenga la capacidad de instalar conjuntos o enjambres de CEO.

Se considera de gran relevancia invertir mayores recursos y esfuerzos, y así llevar a cabo más proyectos conjuntos que cubran la cadena de actividades fundamentales para lograr el aprovechamiento de la energía del mar, explotando los procesos clave que ocurren en el océano frente a los países iberoamericanos. Una alternativa muy atractiva es la posibilidad de coordinar y fomentar proyectos conjuntos a manera de una Latinoamérica unificada y con el respaldo de parte de los países ibéricos.

Por último, en las estimaciones de costos es muy importante tomar en cuenta esos que se refieren a reparar daños y restaurar ambientes deteriorados por el uso de combustible fósil. Al final, definitivamente los costos del desarrollo y utilización de la energía del mar no serán muy diferentes a los asociados con la quema de carbón e hidrocarburos y así podremos dirigirnos hacia un nuevo *status quo*.

Francisco Javier Ocampo Torres

Investigador Titular, Departamento de Oceanografía Física,

*Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada
Baja California, México*

Contenido

AGRADECIMIENTOS

PRÓLOGO

INTRODUCCIÓN

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN ARGENTINA

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN BRASIL

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN CHILE

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN COLOMBIA

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN COSTA RICA

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN CUBA

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN ECUADOR

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN ESPAÑA

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN MÉXICO

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN PANAMÁ

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN EL PERÚ

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN PORTUGAL

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN URUGUAY

INTRODUCCIÓN

Nos encontramos en un momento de transición energética importante, que no supone sólo el paso como fuente de energía del uso masivo del combustible fósil al uso de energías renovables, como consecuencia del desarrollo y la innovación tecnológica. También requiere prestar atención al ecosistema completo, teniendo en cuenta la economía del país concreto, sus políticas energéticas, además de aspectos sociales que tienen que ver con la reducción del consumo de energía y sobre todo de la reducción de las desigualdades en el acceso a los beneficios derivados de estos recursos energéticos.

En esta búsqueda de la transición hacia modelos energéticos más eficientes y sobre todo sostenibles, característica que ya no podemos permitir dejar al margen, sino que ha de convertirse en prioritaria, muchos países han optado en los últimos años por distintos modelos energéticos. Por ejemplo, en el caso de Latinoamérica es habitual encontrar un mix entre energía térmica basada en combustibles fósiles y energía hidroeléctrica, aprovechando los recursos naturales existentes. Sin embargo, la vulnerabilidad que supone la variabilidad climática hace que en muchas ocasiones la escasez hidrológica produzca restricciones en la generación hidroeléctrica y no permita la gestionabilidad deseable para este tipo de energía.

En este sentido, pocos países han dirigido su mirada hacia el mar en busca de recursos energéticos alternativos. Quizá haya sido por falta de la madurez tecnológica necesaria para enfrentarse a un entorno desconocido y hostil como es el marino, o quizás porque las inversiones necesarias son demasiado altas comparado con otras opciones energéticas.

En todo caso, si bien las energías del mar no representan hoy en día un porcentaje importante dentro de las matrices energéticas de los países, sí resultan ser en algunos casos un pilar importante para aportar flexibilidad a los sistemas eléctricos, sobre todo en zonas muy concretas donde la red eléctrica es muy débil (zonas costeras aisladas) o donde el precio de la electricidad es alto o hay ausencia de otros recursos (islas). Los sistemas eléctricos demandan cada vez un recurso energético más diversificado, como se ha demostrado por ejemplo en algunas zonas de Sudamérica, donde una severa sequía está restringiendo seriamente el uso de la energía hidroeléctrica, fuente en la que muchos países basan gran parte de su generación de electricidad, dando lugar a importantes cortes de suministro. Por otro lado, el desarrollo de tecnología para ser usada en entornos marinos tiene una aplicación que trasciende el ámbito de la energía, sirviendo también para la acuicultura, las comunicaciones, el transporte marítimo y la resiliencia ante los efectos climatológicos en algunas zonas.

De esta manera, aparecen en los países Iberoamericanos una serie importante de **oportunidades** que deben ser exploradas y aprovechadas en cuanto a la energía marina:

1. Algunos países como: Argentina, Brasil, Chile, Ecuador, México, Colombia, Costa Rica, Perú, España y Portugal, señalan en algún momento en sus **políticas energéticas** las fuentes de energía marinas como una fuente potencial de energía que debe ser analizada.
2. Hay algunos casos de regiones concretas donde hay un **potencial energético especialmente adecuado** tanto de oleaje (Isla Galápagos, sur de Brasil, Patagonia-

Argentina, algunas áreas de Colombia, sur de Chile, centro de Perú, Costa de la Baja California en México) como de corrientes de marea (corta este de Brasil y estrecho de Magallanes).

3. Muchos países Iberoamericanos tienen antecedentes importantes como potencia naval, lo cual ha permitido desarrollar una **industria naval con capacidades** para desarrollos tecnológicos en entorno marino. A modo de ejemplo, Chile ha estimado que entre el 60 y el 80% de la cadena de valor de un proyecto de energía de oleaje podría ser suministrado con capacidades locales.
4. Se cuenta con **infraestructuras experimentales destacables** en el ámbito de la energía marina. Hay que destacar las instalaciones existentes en: la Universidad de Costa Rica (Costa Rica), el Instituto Hidráulico de Cantabria (España), la Universidad de Campeche (México), el tanque de la Universidad Federal de Rio de Janeiro (Brasil), la Escuela Politécnica del Litoral – ESPOL (Ecuador), la Universidad de la República (Uruguay), Valdivia (Chile), INA (Argentina). Es importante señalar en este punto la conveniencia de laboratorios en entornos naturales, como el existente en Las Cruces (Chile), que son críticos para conseguir operaciones con altos niveles de TRL.
5. **Ha habido y hay desarrollos tecnológicos interesantes** para convertir la energía del oleaje o de las corrientes en energía eléctrica. Son destacables: el proyecto Ceara (Brasil) en 2012, las pruebas del sistema de OPT en Las Cruces (chile) en 2021, el proyecto de la UTN en Argentina para absorbedores puntuales, el proyecto de desalinización acoplada con una planta de aprovechamiento del gradiente salino, en la desembocadura del Río Magdalena (Colombia), los prototipos de turbina hidrocinética de la Universidad de Itajubá (Brasil) y Universidad de Medellín (Colombia) y el prototipo de captura de energía del oleaje de la UTP (Perú).
6. Hay conexiones interesantes de las energías marinas con la producción de **hidrógeno verde**, ya que es un vector energético que permite transportarse en distancias muy grandes, pudiendo moverlo desde zonas de alto recurso a zonas de alto consumo, sin necesidad de una cercanía geográfica.

Por otro lado, existen **retos importantes** que hace falta analizar durante el desarrollo de este tipo de energías:

1. Los **daños medioambientales en entornos marinos**, que han de ser analizados. Algunas zonas de alto potencial energético, como es el caso de algunas zonas en Galápagos, no son practicables por ser una reserva de especies marinas en peligro de extinción.
2. Algunas **líneas eléctricas de transporte y distribución** suelen necesitar ser reforzadas y modernizadas, así como la aparamenta, para poder modificar el sistema eléctrico hacia un sistema más distribuido.
3. Hay que trabajar con la **aceptación social**. Las energías renovables no están tan bien aceptadas como podría pensarse, ya que en algunas zonas se entra en conflicto con

espacios para cultivos, impacto visual, espacios para pesca en entornos marinos, etc.

4. Una penetración importante de energías renovables en los sistemas eléctricos requiere de mecanismos que garanticen la estabilidad del mismo. Por ello, la mayoría de las hojas de ruta y documentos relativos a los sistemas eléctricos señalan el **almacenamiento de energía** como una de las claves para conseguir una mayor y mejor integración de energías renovables en los sistemas de potencia.

Contenido de la publicación

Esta publicación es el principal entregable final que resulta de las actividades de la Red REMAR “Oportunidades de Integración en Redes Eléctricas Iberoamericanas de las Energías del Mar”. Las actividades de la Red han buscado, durante el periodo de cuatro años que ha durado el proyecto, potenciar el desarrollo de la etapa de integración de las energías del mar a diferentes niveles: tecnológico, ayudando a desarrollar algunas ideas y prototipos; formativo, desarrollando cursos y jornadas para explicar este tipo de energías a distintos públicos; científico, elaborando de manera conjunta artículos divulgativos; y socio-político, dando lugar a un informe que resume la situación de cada uno de los 13 países que componen la red en relación con las fuentes de energía presentes en entornos marinos, y que sugiere algunas actuaciones al respecto.

El contenido de esta publicación está basado en el análisis de la información existente sobre energías renovables en general y en particular de energías renovables marinas, en los 13 países que forman la Red REMAR. El documento explora para cada país los siguientes aspectos, tratados en secciones que se repiten en cada capítulo:

1. *Políticas energéticas en energías del mar.*

Se repasan las distintas hojas de ruta y documentos definitorios de las políticas en materia de energías renovables, y en caso de que hubiera, en concreto en renovables marinas.

2. *Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con las energías del mar.*

Se incluyen estudios y análisis del recurso renovable del país, y en caso de existir, de las energías marinas en particular. También se detallan las capacidades industriales de empresas en el sector y las instalaciones experimentales destacables asociadas con la experimentación en energías del mar.

3. *Situación de la red eléctrica en relación con la integración de nuevas energías renovables.*

Se analizan los documentos que hacen referencia a los planes de modernización y expansión de las líneas eléctricas de transporte y distribución. También se añaden en algunos casos la descripción de los problemas derivados de la integración de energías renovables en las redes eléctricas y que pueden llegar a comprometer la estabilidad del sistema eléctrico.

4. *Documentación relativa a energías del mar.*

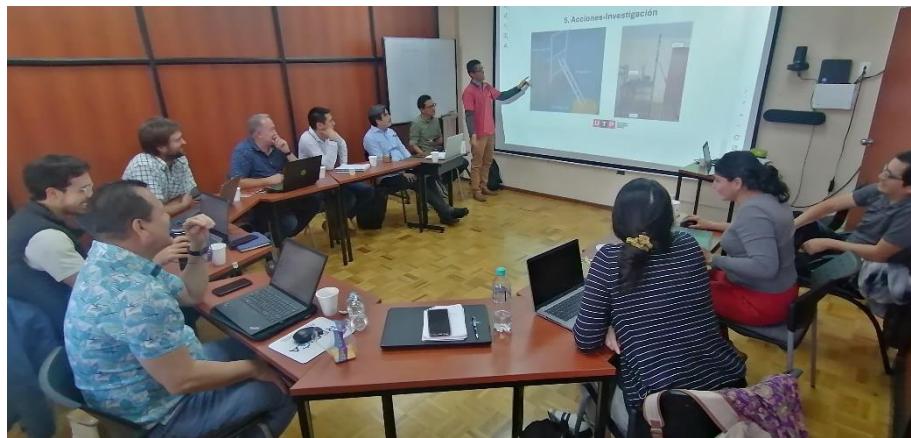
En este apartado se incluye una tabla resumen de la documentación que quedará recogida en un repositorio digital, con todos los documentos relativos a cada uno de los países participantes. La tabla incluirá el nombre del documento para poder localizarlo en el directorio y una descripción breve del documento en sí. El documento persigue, por tanto, ser también una guía para poder localizar información en el repositorio. El repositorio actual es un drive compartido que se localiza en el siguiente enlace:

[PUBLICACION REMAR 2023-2024 - Google Drive](#)

No obstante, el repositorio definitivo estará en el espacio reservado para la documentación de la red en la web de REMAR-CYTED:

<https://www.cyted.org/REMAR>

Los capítulos se refieren a los distintos países y están ordenados de manera alfabética.



Marcos Lafoz Pastor

Coordinador de la Red REMAR-CYTED

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN ARGENTINA

Pablo Alejandro Haim (Universidad Tecnológica Nacional campus Buenos Aires)

Roberto Manuel Tula (Universidad Tecnológica Nacional campus Buenos Aires)

Ana Julia Lifschitz (Universidad Tecnológica Nacional campus Chubut)

Norma Cristofaro (Universidad Tecnológica Nacional campus Chubut)

1. Políticas energéticas en energías del mar

Deberemos considerar que en un futuro cercano las matrices energéticas estarán constituidas principalmente por las energías renovables. Se habla del efecto 20/20/20, es decir que en el año 2020 la matriz energética debería haber contado con un 20% de energías renovables para reducir un 20% la emisión de dióxido de carbono, de allí que debemos organizar, para poder estar acordes a la actualidad.

Nuestro potencial en biomasa es enorme y resulta sin duda una clave de nuestra economía (agricultura, ganadería y biocombustibles), los avances en energía eólica y solar son indicios que estamos entendiendo lo que sucede y nos estamos preparando, ahora nos falta dar un paso más y ser pioneros en la búsqueda de otras alternativas que resultan de potenciales indiscutidos tal como aquellas derivadas del mar. Las ondas marinas son una fuente de energía inagotable y limpia es decir representa una excelente oportunidad para la generación de energía eléctrica en forma sustentable.

Las energías renovables en Argentina están reguladas por la Ley 27.191 (año 2015): Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Modificación por la Ley 26.190: Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Modificación. Creación del fondo fiduciario público.

El objetivo de la ley es que el 20 % de la matriz energética Argentina sea de fuentes renovables para 2025.

Además, la ley 27424 (año 2017) establece el Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable integrada a la Red Eléctrica Pública. La ley incluye a las fuentes de energía establecidas en el artículo 2º de la ley 27.191.

Metas y Proyecciones

1. Generación de Energía Renovable: Argentina aspira a generar el 57% de su energía eléctrica a partir de fuentes renovables para finales de la década. El objetivo es reducir el porcentaje de generación de electricidad a partir de combustibles fósiles del 60% actual al 35% para 2030 mediante la expansión de las energías renovables, incluida la hidroeléctrica, y en particular la eólica y la solar.
2. Capacidad Adicional: De los 14 GW de capacidad adicional previstos en el plan de transición, casi 10 GW corresponden a fuentes limpias, y el resto a gas natural, energía nuclear e hidrógeno.¹
3. Infraestructura: El plan también incluye la construcción de 5.000 kilómetros de nuevas líneas de transmisión, la reducción en un 8% de la demanda total de energía y la generación de un gigavatio (GW) de energía distribuida.

¹ Bello, M. (2023, julio 20). *Argentina quiere lograr una gran expansión de las energías renovables para 2030*. <https://dialogue.earth/es/energia/374748-argentina-quiere-lograr-una-gran-expansion-de-las-energias-renovables-para-2030/>

No hay a la fecha una hoja de ruta de energías marinas renovables oficial del estado argentino. Sin embargo, se cuenta con información sobre las metas de transición energética y generación de energías renovables de Argentina.

En Argentina, se estaban adoptando diversas medidas para impulsar y potenciar la cadena de valor de las energías del mar. Estas medidas se tienen registro hasta diciembre de 2023, incluyeron:

1. Elaborar mapas de potencial energético y establecer localizaciones apropiadas para realizar ensayos piloto en las cuencas offshore.²
2. Realizar estudios de impacto ambiental marino-costero en los sitios identificados.
3. Consolidar capacidades ingenieriles y tecnológicas en las instituciones patagónicas, impulsando la formación especializada en el sector.
4. Desarrollar tecnologías nacionales para las distintas tipologías de energía marina.
5. Diversificar la matriz energética nacional mediante el uso de fuentes renovables, como las energías del mar, con el objetivo de lograr una contribución de estas fuentes hasta alcanzar el 20% del consumo eléctrico de Argentina para el año 2025.

Estas medidas buscan aprovechar el potencial energético del Mar Argentino y promover el desarrollo de tecnologías y capacidades en el sector de las energías del mar, con el objetivo de impulsar la transición hacia una matriz energética más sostenible y diversificada

Argentina ha identificado varias zonas con alto potencial para el desarrollo de energías renovables:

Región Patagónica: Presenta excelentes condiciones para el desarrollo de energías marinas, como fuertes oleajes y grandes amplitudes de mareas.

Zonas de Energía Eólica y Solar: La región patagónica y otras áreas del país son ideales para la energía eólica y solar debido a sus condiciones climáticas favorables.

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con las energías del mar

Considerando que el mejor indicador para evaluar preliminarmente el recurso oleaje a lo largo de la costa es la potencia media anual de las olas, se utilizó la siguiente fórmula que se utilizó para su cálculo:

$$Pw = (421*Hs^2*Tp)/1000 \text{ [kW/m]}$$

La Figura 1 muestra el potencial undimotriz en el litoral marítimo de Buenos Aires en una escala de kilovatios por metro lineal de costa. La sección más energética (11-13 kW/m) está

² *Energía y Minería.* (2016, julio 12). Pampa Azul - Pampa azul; Pampa Azul. <https://www.pampazul.gob.ar/investigacion-y-desarrollo/desarrollo-tecnologico/energia-mineria/>

situada en la sección central de la provincia, en correspondencia con las mayores profundidades observadas, que atenúan el proceso de refracción del oleaje. Hacia el sudoeste y noroeste, los valores se reducen hasta llegar a valores inferiores a 5 kW/m.

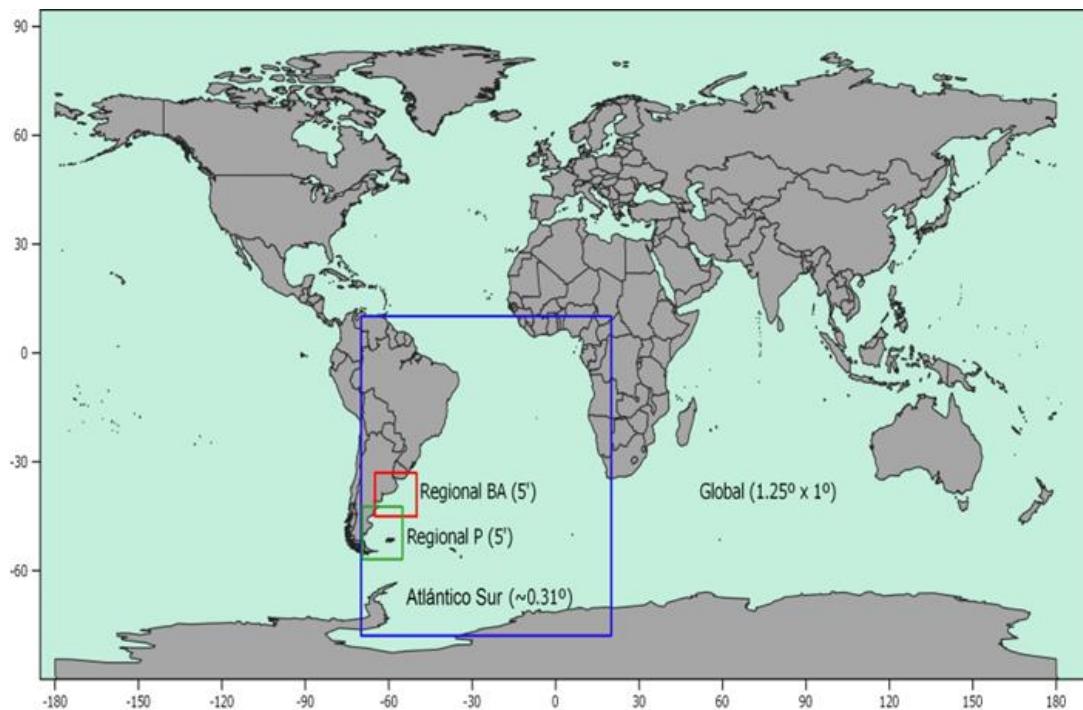


Figura 0. Potencial undimotriz en la costa de Argentina.

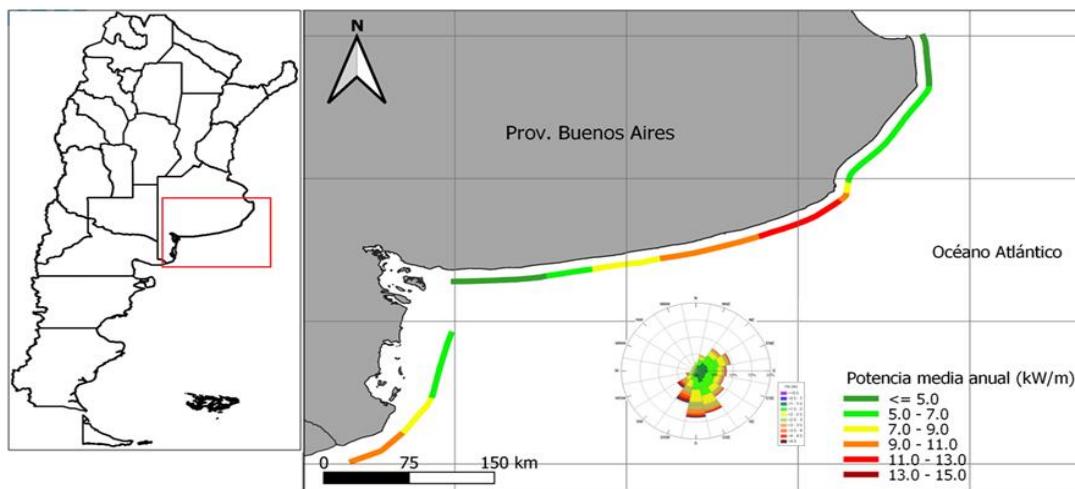


Figura 1. Potencial undimotriz en la costa de la provincia de Buenos Aires.

El recurso undimotriz para el sector costero norte de la Patagonia (Figura 2) muestra que, en términos generales, la energía disponible es menor que en el sector costero de la provincia de Buenos Aires. Los valores de potencia de las olas se reducen significativamente dentro de los golfos, ya que estos forman áreas de refugio naturales de acuerdo con la dirección

predominante de las olas. Los valores más altos se encuentran en el extremo sureste de Península Valdés y en Bahía Camarones, alcanzando los 11-13 kW/m.

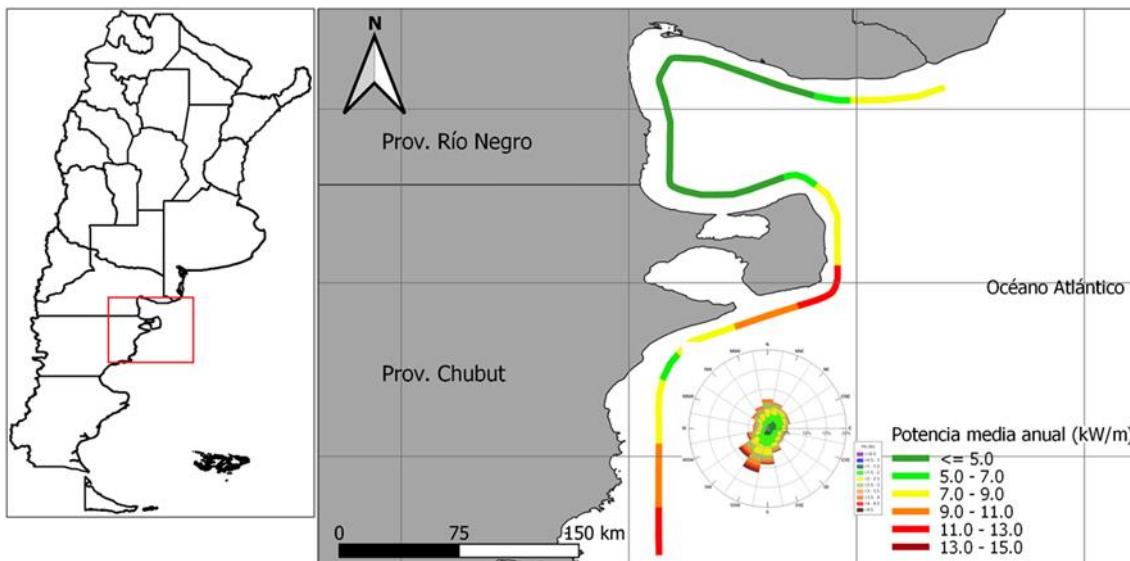


Figura 2. Potencial undimotriz en la costa de las provincias de Río Negro y Chubut.

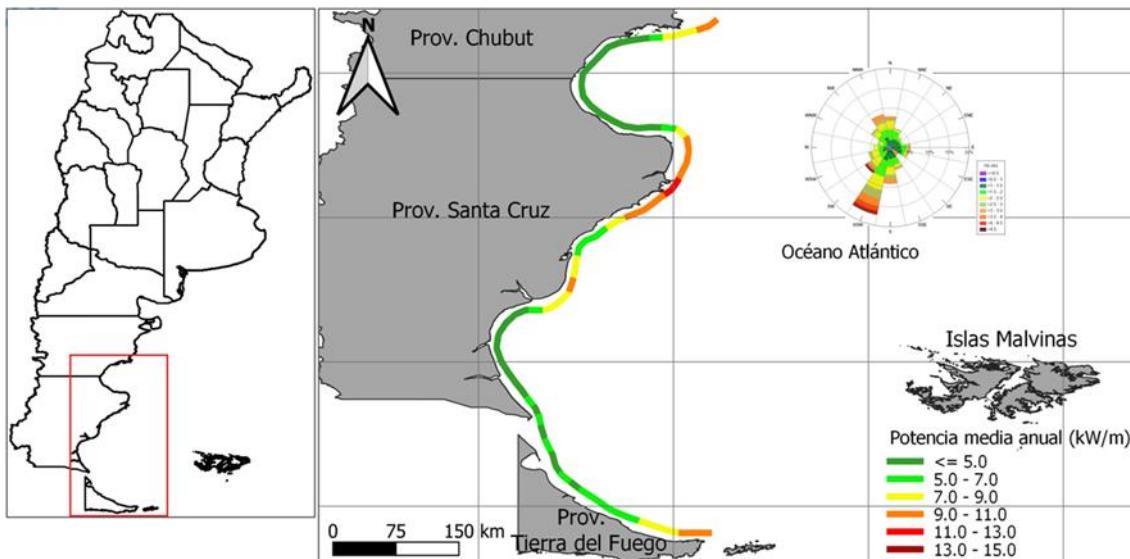


Figura 3. Potencial undimotriz en la costa de las provincias de Chubut (sur), Santa Cruz y Tierra del Fuego.

En el sector costero sur de la Patagonia encontramos los valores más bajos de energía del oleaje (Figura 3). El Golfo San Jorge y una franja costera que va desde el estuario del río Santa Cruz hasta casi el extremo sur de Tierra del Fuego concentran un potencial undimotriz que generalmente está por debajo de los 5 kW/m. Los valores más altos los encontramos en un sector de 172 km al sur del Golfo San Jorge, con una potencia media anual entre 9 y 13 kW/m [Tomazin, N, Haspert, F. (2024). Evaluación del Recurso Potencial de Energía Undimotriz a lo

largo del litoral Marítimo de Argentina, Instituto Nacional del Agua (INA), Laboratorio de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina].

En Argentina, al día de la fecha no existen instalaciones significativas a nivel nacional para ensayos o conexiones de energías del mar que estén en funcionamiento en condiciones reales. Si existe un proyecto de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires que han desarrollado tecnología de energía undimotriz probado en canales de olas y están actualmente en el desarrollo tecnológico para probar el equipo en condiciones reales en el Mar Argentino.

Hasta el momento no se cuenta con instalaciones para ensayos y pruebas de dispositivos energéticos en ambiente marino. Sin embargo, hay centros universitarios y de investigación a nivel nacional que cuentan con canales de prueba donde es posible estudiar dispositivos de energías marinas. Por ejemplo, el Instituto Nacional del Agua (INA; <https://www.argentina.gob.ar/ina>), tiene un canal para pruebas hidráulicas de 30 m de largo, 0.7 m de ancho y 1.0 m de profundidad, capaz de generar ondas de hasta 10 cm de altura con periodos de hasta 1 segundo; la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, (FIUBA; <https://www.fi.uba.ar/>), también cuenta con un canal de 72 m de longitud, que permite realizar pruebas de modelos de embarcaciones y prototipos en general. El canal está equipado con instrumentos actualizados de alta precisión; la Universidad Tecnológica Nacional Regional Mar del Plata, el canal Hidrosim, es de ciclo cerrado. El mismo fue diseñado considerando una sección de pruebas que permita analizar modelos con escalas en un rango de 1:50 a 1:30, con números de Froude del orden de 0,15 y velocidades del fluido del orden de los 0,15 a 0,50 m/s. Estas velocidades en la zona de ensayo se alcanzan utilizando una bomba del tipo centrífugo de 650 m³ /h y 38 kW de potencia.

Aún no hay empresas dedicadas a trabajar en energías marinas, si hay empresas que se dedican a medición de las condiciones Marinas como: Ezcurra & Smith (<https://www.essa.com.ar/>), Servicio de Hidrografía Naval (<https://www.hidro.gov.ar/>), Atonsys (<https://www.atonsys.com.ar/es/>) y Crux Marine (<https://crux-marine.com/>).

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de nuevas energías renovables

Dentro de las metas de transición energética y generación de energías renovables de Argentina en general, el plan oficial de transición energética presentado a finales de junio de 2023, Argentina pretende generar el 57% de su electricidad a partir de fuentes renovables para finales de la década. Además, propone construir 5.000 kilómetros de nuevas líneas de transmisión, reducir un 8% la demanda total de energía y generar un gigavatio (GW) de energía distribuida. El plan también busca reducir el porcentaje de generación de electricidad a partir de combustibles fósiles del 60% actual al 35% para 2030, mediante la expansión de las energías renovables, incluidas la hidroeléctrica, la eólica y la solar, a este plan se lo denomina, plan nacional de transición energética 2030, como se detalla anteriormente, con el correspondiente marco regulatorio.

No hay a la fecha una hoja de ruta de energías marinas renovables oficial del estado argentino. Sin embargo, se cuenta con información sobre las metas de transición energética y generación de energías renovables de Argentina.

Existe un PLAN DE OBRAS PRIORITARIAS SECRETARÍA DE ENERGÍA DE LA NACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN PARA ASEGURAR EL BUEN FUNCIONAMIENTO DE TODO EL SISTEMA ARGENTINO DE INTERCONEXIÓN (SADI) (2022): Plan Nacional de Expansión del Transporte Eléctrico 2035.

Alcances: se establece el trazado de 11.800 km (36% respecto al sistema del año de la realización del plan) y una potencia de transformación de 16.000 MVA (42 % más)

Beneficios:

- Abastecer el crecimiento de la demanda, previsto en unos 10.000 MW para los próximos 10 años.
- Ingresar al menos 10.600 MW de generación eficiente adicional al sistema.
- Mantener la seguridad operativa del sistema durante el crecimiento.
- Viabilizar el desarrollo productivo federal.
- Cumplir con el objetivo del 20% de abastecimiento de energía eléctrica con fuentes renovables, tal cual descrito en la Ley 27.191.

Mar Argentino y Dirección de las Ondas

La costa patagónica presenta un escenario óptimo de trabajo debido a la escasa profundidad del lecho marino (200 m) aún a distancias considerables de las costas (200 millas), esto facilita la instalación de los equipos. [Francisco Galia. (2011). Energía del Mar, congreso HyFUSEN. Mar del Plata, Argentina]

El litoral marítimo de nuestro país tiene una longitud de 5.087 km, su superficie es de 2.800.000 km² cuenta con una plataforma que ensancha hacia el sur. Una de las fortalezas de este proyecto es la presencia constante del viento en nuestro mar austral, generando el fenómeno de manera regular y con buena intensidad.

Por otro lado, de no registrarse acción del viento en la región de captación, se podría verificar la presencia de ondas provenientes de regiones lejanas. Los antecedentes internacionales indican que la tecnología actual tiene una limitación técnica de captación de ondas que van de 0,5 a 2,5 metros de altura. En nuestro país la altura de las ondas va desde 1 hasta 2m dependiendo de la región a analizar, al sur mayor altura de ondas.

4. Documentación relativa a energías del mar en Argentina

Argentina		
Nº	Nombre del documento	Contenido del documento
1	Estudio del campo de olas, del flujo de energía paralelo a la costa	Se investigó el campo de olas y el flujo de energía paralelo a la costa entre el estuario de Bahía Blanca

	<p>y de sus tendencias en la región litoral, entre Bahía Blanca y Puerto Quequén; Iael Perez; 2014; UBA</p>	<p>y Puerto Quequén, utilizando resultados de simulaciones numéricas obtenidas con el modelo SWAN (período 1971-2005).</p>
2	<p>Evaluación del potencial energético de las olas en la plataforma continental de Tierra del Fuego, Argentina; Lic. Ana Julia Lifschitz; 2010; UBA y SHN</p>	<p>Se investigó el clima de olas en la plataforma fueguina con el objeto de evaluar cuantitativamente su potencial energético. El presente estudio se realizó utilizando un modelo de generación, propagación y transformación de olas reconocido (SWAN) forzado con vientos provenientes de la base pública NCEP/NCAR.</p>
3	<p>Caracterización del recurso undimotriz en el litoral marítimo argentino; Das Neves Guerreiro, Ricardo, Chandare, Sonia; World Congress & Exhibition ENGINEERING 2010-Argentina</p>	<p>Este artículo caracteriza el recurso undimotriz a lo largo del litoral continental Argentino. Se estudia además, la variabilidad anual, estacional y horaria, el porcentaje de ocurrencia por potencia y se realiza un análisis general del recurso en las cercanías de la costa.</p>
4	<p>Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica, Proyecto PIO CONICET – Fundación YPF, INA, 2018 (Informe 1)-2020(informe 2)</p>	<p>Se exponen aprovechamiento energético vinculado a las mareas: energías mareomotriz e hidrocinética, sus particularidades e implantaciones, y se describe el estado actual de desarrollo de cada una. Además, se presenta la metodología de modelación que se implementará para determinar el potencial hidrocinético disponible en cinco estuarios patagónicos.</p>
5	<p>Estudio del recurso energético marino sobre el estuario del río gallegos; Buono Nicolás, Zabaleta Federico, Cáceres Raúl, Tomazin Nicolás, Cecotti Roberto; UNLP, INA; 2016</p>	<p>Predecir a mediano plazo y a gran escala, los campos de corrientes y la dinámica costera que afecta la región. Tales modelos numéricos fueron validados a través de mediciones de campo sobre las diversas variables involucradas. A su vez, se realizó un análisis detallado de los campos de vientos, las condiciones de oleaje y su influencia sobre la zona de interés, utilizando un modelo espectral para la generación y transformación de olas.</p>
6	<p>Estudio básico del potencial undimotriz en el litoral próximo al puerto de Quequén, provincia de Buenos Aires, República Argentina, Paolo Gyssels, Pablo Alejandro Haim, Mario Pelissero, 2016, Revista proyecciones</p>	<p>Se reseñan las actividades que llevaron a la construcción y prueba de diferentes modelos de un dispositivo para la conversión de la energía undimotriz en electricidad, así como la selección del lugar costero para su ensayo a escala real.</p>

7	Energías Renovables Marinas. Una alternativa sustentable para contribuir a la satisfacción de las futuras demandas energéticas; Griselda Alejandra Carreras; UTN; 2015	Aprovechamiento de energías marinas, técnicas y dispositivos.
8	El potencial energético renovable del mar argentino; Griselda A. Carreras, Alejandro P. Haim, Mario A. Pelissero y Ana J. Lifschitz; Revista "Ciencia e Investigación"; 2022	El Potencial Energético Renovable Del Mar Argentino al 2022

5. Conclusiones finales y recomendaciones

La creciente demanda de energía para satisfacer las necesidades de la población mundial y la mitigación del cambio climático reinante están impulsando estudios sobre exploración y utilización de nuevas fuentes de energía alternativas, que sean limpias, sustentables y amigables con el medio ambiente (con un mínimo de impacto sobre el mismo). Entre todas las energías limpias disponibles, las energías marinas (olas, corrientes, mareas) son muy prometedoras por su “cuasi infinita” condición. Dentro de las mismas, la asociada a la dinámica de las olas (undimotriz) con potencias medias que van desde los 97 a los 29 kW/m de frente de onda, parecería ser una alternativa viable para localidades costeras y para suministrar energía al interconectado eléctrico nacional.

El clima y las características de la plataforma continental argentina hacen prever que la potencia de olas, las corrientes marinas y la diferencia de pleamar y baja mar (mareomotriz) a lo largo del litoral marítimo se encuentra en valores elevados y cada estudio que se lleva a cabo afirma esta condición.

Como recomendación para que este panorama de recurso energético marino se desarrolle e impacte en la sociedad se propone.

Desde 2015, Argentina ha buscado promover la energía renovable como parte de su estrategia energética. La implementación de un régimen de fomento a la energía eléctrica de fuentes renovables ha sido un paso importante hacia la transición energética, buscando diversificar la matriz energética del país y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Se estaban adoptando diversas medidas para impulsar y potenciar la cadena de valor de las energías del mar registradas hasta diciembre de 2023.

A pesar que la política energética de Argentina ha sido un tema de debate debido a su impacto en el déficit fiscal y en la balanza de pagos. El estado Nacional no interviene en el desarrollo energético de ninguna fuente renovable ni tampoco en obras de infraestructura con intervención del estado Nacional.

Podemos enunciar las recomendaciones generales para fortalecer el desarrollo de las energías oceánicas en Argentina en los siguientes puntos:

1. **Desarrollar una política de estado que se mantenga en el tiempo**, con la financiación correspondiente para el desarrollo de las energías renovables, entre ellas la Marina.
2. **Trazar una Hoja de Ruta** específica para el Desarrollo de las Energías del Mar y su integración con el sistema actual energético.
3. **Ley de ordenación del espacio marítimo** (OEM), que aseguren que las instalaciones de energías del mar se desarrollen de manera compatible con otros usos del mar.
4. **Intervención Estatal**, Es importante que la intervención del gobierno sea eficiente y efectiva. Esto implica una gestión transparente y responsable de los recursos, así como la implementación de políticas que promuevan la competencia y la innovación en el sector energético. Mensurar in situ las distintas energías marinas, obteniendo un mapa preciso de cada una de ellas.
5. **Promover la inversión y el financiamiento**, fomentar la creación de incentivos fiscales y programas de financiamiento para proyectos de energía marina, posibilitando el acceso a financiamiento público y privado.
6. **Simplificación regulatoria y de permisos**, mejorar los procesos de obtención de permisos y garantizar que las regulaciones sean claras y predecibles, reduciendo así los obstáculos administrativos para el desarrollo oportuno de proyectos, reduciendo así la incertidumbre entre inversores y desarrolladores.
7. **Impulsar la I+D+i**, Fortalecer la investigación y el desarrollo en tecnologías de energías renovables es esencial para colocar a la Argentina competitiva en este campo. Esto puede implicar la creación de centros de investigación y la financiación de proyectos innovadores y becas nacionales e internacionales.
8. **Desarrollo de infraestructura y logística**, mejorar la infraestructura portuaria y logística necesaria para instalar y mantener equipos marinos, garantizando que las instalaciones puedan operar de manera eficiente y segura.
9. **Desarrollo de Infraestructuras**, para soportar la transición energética, es necesario desarrollar y modernizar la infraestructura energética. Esto incluye la mejora de las redes de transmisión y distribución y la construcción de instalaciones de generación de energía renovable.
10. **Cooperación Internacional**, la cooperación internacional puede ser una valiosa fuente de apoyo para la transición a las energías renovables. Esto puede incluir la participación en acuerdos internacionales, la búsqueda de financiación internacional y la colaboración en investigación y desarrollo.

Estos puntos proporcionan un marco para una política energética que puede ayudar a Argentina a enfrentar sus desafíos económicos, aprovechar sus recursos renovables y avanzar hacia un futuro energético más sostenible.

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN BRASIL

Milad Shadman (Universidad Federal Rio de Janeiro)

Thyago Estrabis (Universidad Federal Rio de Janeiro)

Tania Arispe Angulo (Universidad Federal Itajubá)

Germán Niño del Río (Universidad Federal Itajubá)

Darwin Maestre (Universidad Federal Itajubá)

1. Políticas energéticas en energías del mar

In Brazil, energy policies aimed at renewable energies, including marine energy, have evolved significantly over the past decades. The initial regulatory framework was established by Law No. 9,427 of 1996, which created the National Electric Energy Agency (ANEEL) to regulate the production and distribution of electric power in the country. In 1997, Law No. 9,478 established the National Council of Energy Policy (CNPE) and the National Petroleum Agency (ANP), both responsible for developing solutions for energy supply and promoting the use of alternative energy sources.

These laws were complemented by initiatives such as the Program for the Incentive of Alternative Sources of Electric Energy (Proinfa), created in 2002 by Law No. 10,438. This program was designed to increase the share of renewable energy sources such as wind, biomass, and small hydroelectric plants within the National Interconnected System (SIN), marking a significant milestone in Brazil's transition to renewable energy.

In the marine energy context, Brazil recently advanced with Decreto No. 10,946 of 2022, which regulates the use of physical spaces and natural resources in territorial waters, the exclusive economic zone, and the continental shelf for offshore energy generation projects. This decree was essential to develop offshore wind energy, which previously needed a specific regulatory framework.

In addition, the country is currently discussing Law Project No. 576 of 2021, which, once approved, will establish more detailed regulations for exploring offshore energy potential, particularly wind energy. The demand for clearer rules in this sector has been driven by the increasing number of offshore wind energy projects currently undergoing environmental licensing through IBAMA.

Brazil's offshore oil and gas sector presents opportunities and challenges for developing offshore wind energy. Extensive experience in deep and ultra-deepwater oil and gas operations could benefit the offshore renewable energy sector through technology transfer.

For the potential, Brazil was the third most attractive country in renewable energy investments behind China and the United States of America, with an amount of US\$25 billion. Considering the Latin America scenario, Brazil is the leader in contributions, representing 82% of total new investments in clean energy in Latin America in 2023. At the end of 2023, The Ministry of Development, Industry, Commerce and Services (MDICS) published that half of the investment flow is renewable energy.

The Brazilian government, through the National Bank for Economic and Social Development (BNDES), is the main investor, which, in collaboration with the Ministry of Mines and Energy (MME), created a fund for investments in strategic mineral projects for the energy transition. In addition, the Northeast Bank of Brazil wants to finance sustainable energy, focusing on the size of micro and small companies(BANCO..., 2024). The bank's strategy to finance investments has been to seek cooperation with multilateral entities and organisations such as the NDB (New Development Bank of the BRICS) and the IDB (Inter-American Development Bank), as well as private entities like the AFD (French Development Agency) and KFW; in addition to leveraging re- sources from BNDES (National Bank for Economic and Social Development), the Financier of Studies and Projects (Finep), and the New General Tourism Fund (Fungetur).

The Brazilian government has also implemented fiscal incentives to promote renewable energy projects. For instance, there are exemptions from taxes for importing parts exclusively used in wind energy generation and exemptions on transactions involving solar and wind energy equipment. The tax reform approved in 2023, which will take effect in 2026, aims to standardise these incentives, facilitating the expansion of renewable energy infrastructure.

Brazil's National Energy Plan 2050 (PNE 2050) outlines strategic guidelines for the energy transition, emphasising increasing the share of renewable energy. In oceanic renewable energy, the PNE 2050 highlights the significant potential of offshore wind and floating solar energy sources. The plan includes market trend analyses and forecasts, considering different scenarios for implementing these technologies, and considering variations in OPEX and CAPEX. Additionally, it discusses the potential impacts of regulatory frameworks, particularly those related to distributed generation, and how these regulations may influence integrating these energy sources into the national power grid.

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con las energías del mar

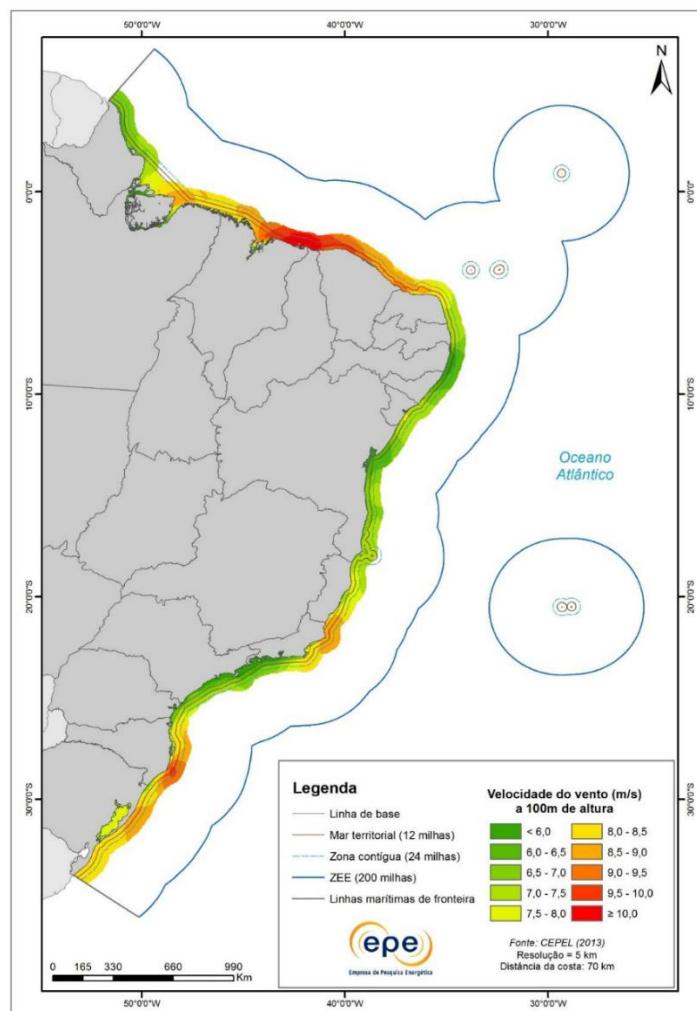


Figura 1. Offshore wind potential in Brazilian Coast. EPE – Brazilian Offshore Wind Roadmap.

The document: "Brazilian Offshore Wind Roadmap", published in 2020 by the Ministry of Mines and Energy in partnership with the World Bank, estimates Brazil's offshore wind generation potential at approximately 700 GW, considering areas with depths of up to 50 meters and wind speeds exceeding 7 m/s. This potential is concentrated mainly in the Northeast and Southeast regions, with states like Ceará, Rio de Janeiro, and Rio Grande do Sul being key focus areas due to favourable wind conditions.

Brazil is rapidly advancing in offshore renewable energy, leveraging its extensive coastline and favourable environmental conditions. This progress encompasses offshore wind, solar, wave energy, and other innovative technologies. The regulatory framework for offshore wind energy is maturing, with guidelines from the Brazilian Institute of Environment and Renewable Natural Resources (IBAMA) for environmental licensing already in place and pending legislation to regulate offshore wind areas.

While no wind turbines are currently operational along Brazil's coastline, 94 projects have begun environmental licensing as of April 2024, aiming for a total capacity of about 230 GW.

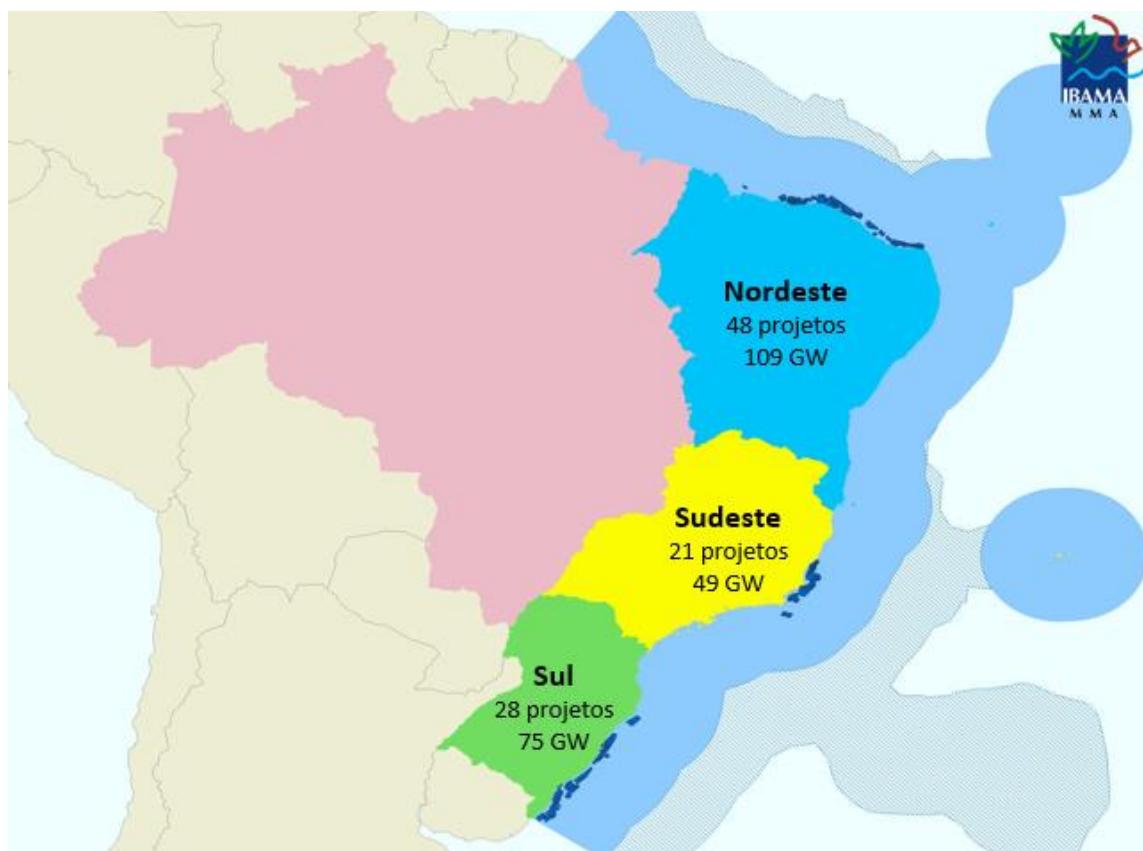


Figura 2. Offshore Wind environmental license projects
IBAMA

The country is also exploring renewable hydrogen production using offshore wind, with several projects in the early development stages. Brazil's commitment to renewable energy extends to strategic initiatives such as Petrobras's 2024-2028 Strategic Plan, which allocates \$11.5 billion for decarbonisation and low-carbon projects.

Beyond offshore wind energy, floating solar power is being explored in Brazil, primarily in hydroelectric plant reservoirs. The pilot project in the reservoir of the Sobradinho Hydroelectric Plant

in Bahia, with an installed capacity of 1 MW, is a notable power and serves as a model for future installations. Other reservoirs in states like Minas Gerais, São Paulo, and Rio de Janeiro are also being evaluated for installing floating solar panels.

Brazil has emerged as a leader in wave energy within Latin America, exemplified by installing its first full-scale wave energy converter prototype in Pecém, Ceará, in 2011. Although the initial 100 kW device was decommissioned after 12 months due to port expansion, it underscored Brazil's technological prowess in wave energy (COSTA; GARCIA-ROSA; ESTEFEN, 2010).

In Rio de Janeiro, another significant project is underway with a 50 kW point absorber wave energy converter designed for shallow waters (25-30 meters). Currently undergoing medium-scale laboratory tests, this initiative represents a crucial advancement towards commercial wave energy deployment in Brazil (AVALOS; SHADMAN; ESTEFEN, 2021; SHADMAN et al., 2018)

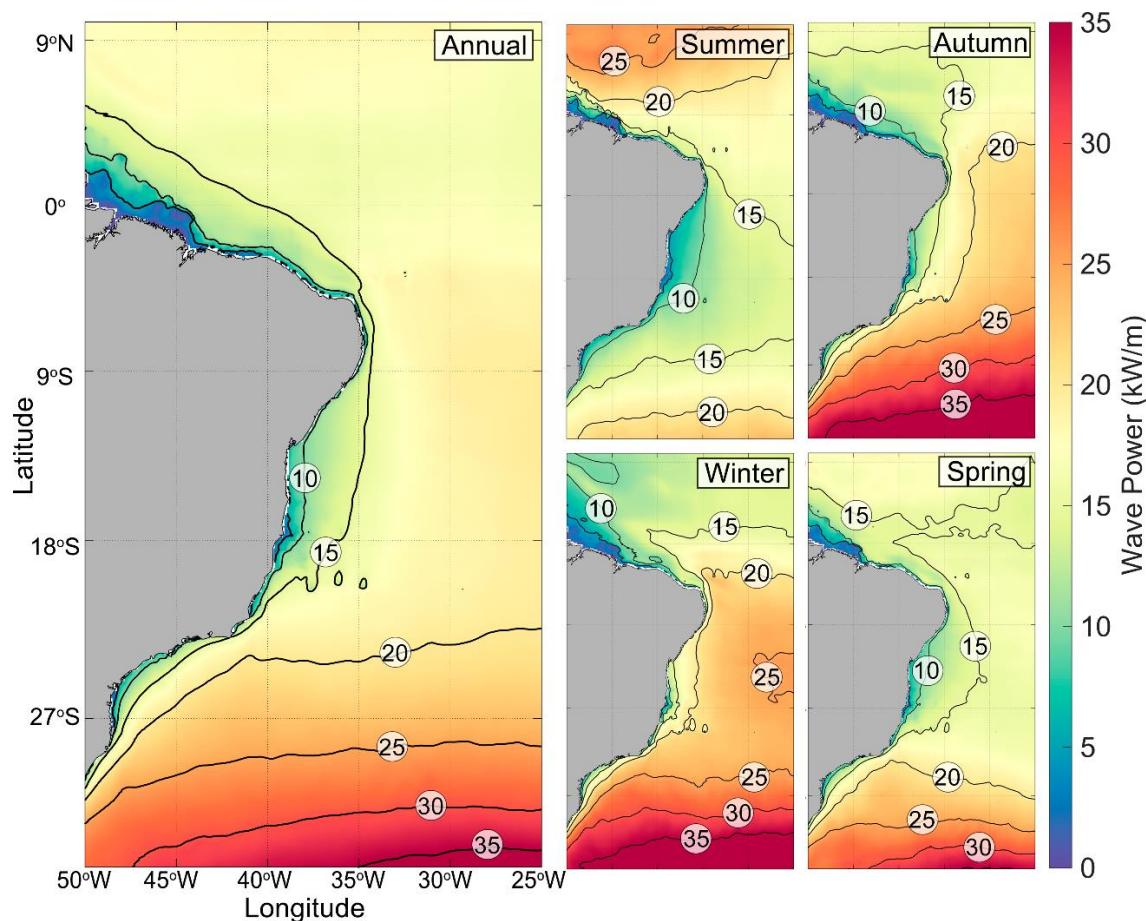


Figura 3. Wave potential in Brazilian Coast. Shadman(2019)

Moreover, international collaborations, such as those with the World Bank, underscore Brazil's efforts to map offshore wind potential and explore sustainable exploitation methods.

Other sources are also being considered for implementation in Brazilian territory, although the regulatory frameworks are still underdeveloped, as with OTEC – Ocean Thermal Energy Conversion.

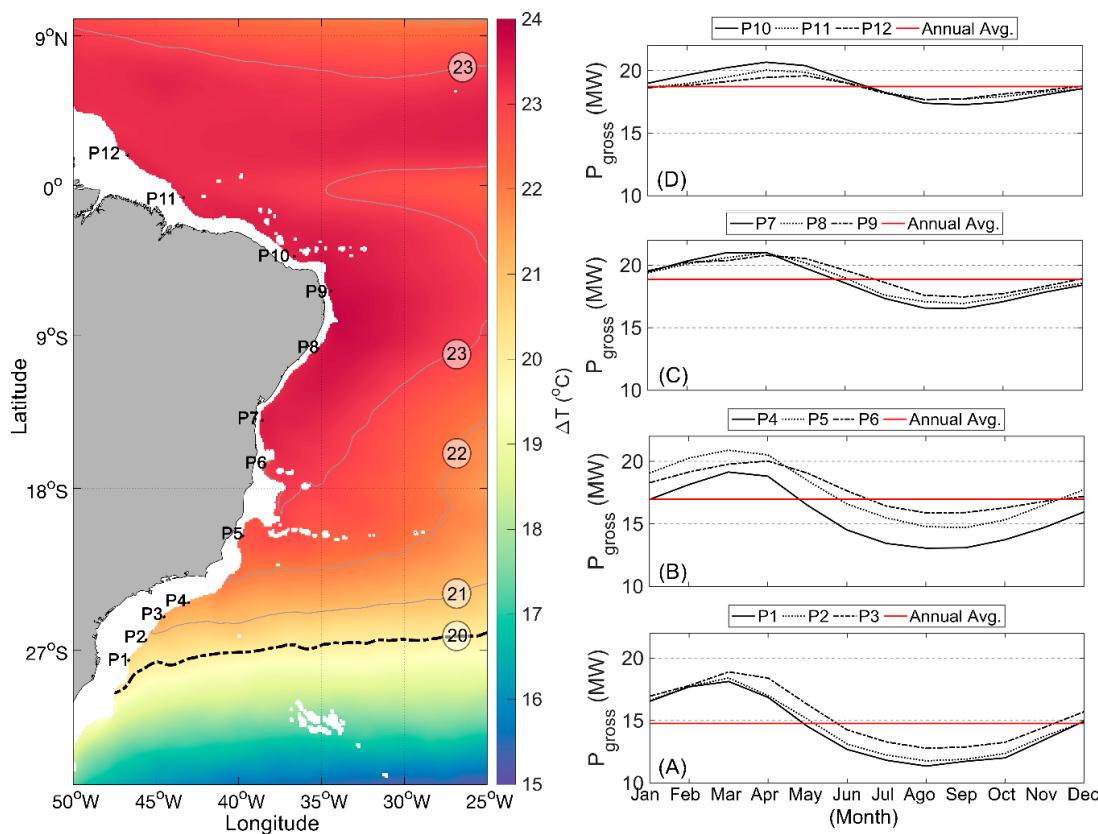


Figura 4. Wave potential in Brazilian Coast. Shadman(2019)

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de nuevas energías renovables

Brazil's electrical grid, known as the National Interconnected System (SIN), is one of the most advanced in Latin America, with a strong emphasis on integrating renewable energy. The SIN is divided into four interconnected subsystems—North, Northeast, South, and Southeast/Central-West—allowing energy exchange between all country regions. This system is robust for supporting the expansion of renewable energy sources, particularly those located along the coast, such as offshore wind and wave energy.

In Brazil, several comprehensive documents outline the current state of the electrical grid, expansion plans, key issues, and proposed solutions at the national level. The principal documents include the Decennial Energy Expansion Plan 2030 (PDE 2030), the National Energy Balance (BEN) prepared by the Energy Research Company (EPE), and the annual report by the National Electric System Operator (ONS).

The Decennial Energy Expansion Plan 2030 (PDE 2030), released in 2021, provides an in-depth analysis of Brazil's electricity grid expansion plans. It considers various energy generation sources' economic and socio-environmental aspects, including CAPEX and OPEX for generation, transmission, and system operation. The plan addresses offshore wind and floating solar energy as potential sources but does not deeply explore these technologies. This document is crucial for understanding the strategic direction and priorities for the Brazilian electrical grid expansion.

The National Energy Balance, published annually by the EPE, offers a detailed overview of the previous year's national energy matrix. It includes data on energy production, consumption, and integrating various energy sources into the grid. This document is essential for analysing the trends and shifts in Brazil's energy landscape, providing a factual basis for planning and policy-making.

The ONS Annual Report compiles actions related to the planning and operation of the SIN. It highlights the challenges encountered during the year and the solutions implemented to address them. The report is valuable for understanding the electrical grid's operational dynamics and real-time management.

The SIN, with an extension of 171,640 km of transmission lines, has already incorporated large amounts of renewable energy, with approximately 89.2% of Brazil's electricity generation coming from renewable sources, led by hydropower (58.9%) and onshore wind energy (13.2%) (ONS, 2024). The SIN had been project to reach 200,015 km by 2028. The presence of electrical grids near the coast, with a high population concentration, is advantageous for offshore renewable energy generation.

With the Electricity generation in Brazil reaching 723.2 TWh in 2023, with an installed generation capacity of 225.952 GW, the Brazilian Electric Matrix predominantly consists of renewable sources, comprising 89.2% of electric generation, with hydropower being the main source, with 58.9% of Brazilian domestic supply (considering that almost all imports come from the Itaipu power plant). Onshore wind represents the second-largest portion, with 13.2%.

In addition to grid expansion, Brazil is exploring renewable hydrogen production using offshore wind energy. This emerging technology is expected to contribute to decarbonisation efforts and diversify Brazil's renewable energy mix. The country is also pursuing collaborations with international organisations, such as the World Bank, to map offshore wind potential and develop sustainable energy exploitation strategies.

The Brazilian electrical grid is well-positioned to integrate more renewable energy, particularly offshore wind and other marine sources. The expansion plans and investments in grid infrastructure and emerging technologies highlight Brazil's commitment to a sustainable energy future.

4. Documentación relativa a energías del mar en Brazil

Brazil		
Num	Nombre del documento	Contenido del documento
1	Plano Nacional de Energia - 2050	The document details analyses and research conducted to support the formulation of a long-term strategy for expanding energy supply.
2	Plano Decenal de Expansão de Energia 2030	Indicate the government's prospects for expanding the energy sector by 2030.
3	Balanço Energético Nacional 2024	Presents the detailed accounting related to energy supply and consumption in Brazil.
4	Roadmap Eólica Offshore Brasil	Discuss the perspective and technical, economic, and environmental aspects of offshore wind energy in Brazil.
5	Mapas de projetos em licenciamento - Complexos Eólicos Offshore – IBAMA	Detailed details of the offshore wind projects currently in the environmental licensing stage by IBAMA (Brazilian Institute of Environment and Renewable Natural Resources).
6	PL 576/2021	Law project proposing the generation of electric energy from offshore ventures.
7	ONS - Relatório Anual 2023	Discusses the National Interconnected System (SIN) operation and operational performance in the year 2023.
8	Energy Transition Investment Trends 2024 - BloombergNEF	Addresses the investment trends in energy transition in 2024.
9	Incentivos fiscais para energias renováveis na América do Sul - pwc	Discuss the fiscal incentives for renewable energy in South America.
10	Solar Fotovoltaica Flutuante: Aspectos Tecnológicos e Ambientais relevantes ao Planejamento	Discuss the technical and environmental aspects of floating solar technology in Brazil.

5. Conclusiones finales y recomendaciones

Brazil has made significant strides in developing and integrating marine renewable energies, building on its extensive coastal resources and favourable environmental conditions. The regulatory framework, particularly with the introduction of Law No. 10,946 in 2022, has set the stage for offshore energy projects, especially in wind energy. However, further advancements in regulation and international collaboration are essential to unlock the full potential of Brazil's marine energy sector.

To continue progressing in this field, the following key recommendations are proposed:

1. **Strengthening the Regulatory Framework:** Brazil should prioritise finalising and implementing comprehensive regulations for offshore renewable energy. This includes advancing legislative efforts such as Law Project No. 576 from 2021 to offer clear guidelines for investors and developers in the sector.
2. **Enhancing Grid Integration:** Expanding the National Interconnected System (SIN) is crucial to support the integration of new offshore energy sources. A particular focus should be placed on regions along the coast with higher energy demand, ensuring robust infrastructure for future developments.
3. **Fostering International Collaborations:** Brazil should seek to enhance its partnerships with international organisations like the World Bank and the New Development Bank. These collaborations will provide valuable expertise and support the implementation of cutting-edge offshore renewable energy technologies.
4. **Promoting Technological Innovation:** Investment in research and development should be increased, focusing on emerging technologies such as wave energy converters and floating solar power. Diversifying Brazil's renewable energy portfolio will be key to ensuring long-term sustainability.
5. **Supporting Financial Investments:** Continuing to offer fiscal incentives for renewable energy projects is essential. In addition, Brazil should pursue further cooperation with multilateral financial institutions to secure the necessary funding for large-scale marine energy initiatives.

By addressing these aspects, Brazil can consolidate its position as a leader in renewable energy within Latin America and significantly contribute to global climate change mitigation efforts.

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN CHILE

Gonzalo Tampier Brockhaus(Universidad Austral)
Nathalie Almonacid Valenzuela (MERIC)
Natalia Azares Aguayo (MERIC)

1. Políticas energéticas en energías del mar

Hasta la actualidad, en Chile, existe una ausencia de un marco regulatorio para proyectos de energía renovable marina o de proyectos energéticos mar afuera en general.

Lo más cercano en cuanto a legislación, son la Ley de Energías Renovables No Convencionales del año 2007 que proponía como meta alcanzar un 10% de participación de las ERNC para el 2024, y la Ley de Impulso a las ERNC (Ley 20/25) del 2013 que aumentó la meta a un 20% para el 2025. Estos objetivos ya fueron alcanzados, pues las ERNC alcanzan a la fecha una participación mayor al 30%, principalmente de energía solar y eólica.

Una parte importante de la regulación nacional es el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, que permite a la autoridad determinar antes de la ejecución de una iniciativa si cumple con la legislación ambiental vigente y si aborda potenciales impactos ambientales significativos. Esta herramienta, que es obligatoria para algunos proyectos de inversión, es un proceso voluntario para otros, dependiendo de la dimensión y cantidad de MW a generar.

En 2019, MERIC publicó una guía práctica de la [normativa ambiental](#) aplicable en Chile (1). Ésta desarrolla aspectos generales y particulares del mantenimiento y puesta en marcha de proyectos de esta naturaleza. Se consideran aspectos como el agua, el suelo, el aire, el ruido, la flora y la fauna, el patrimonio cultural y los residuos. Además, se discuten permisos ambientales y requisitos ambientales específicos. Este informe indica: Las regulaciones y requisitos ambientales vigentes en Chile son un elemento clave para evaluar la factibilidad de desarrollar proyectos de energía marina en Chile. En materia de regulación ambiental asociada a proyectos de energía marina, el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), D.S. 40/2013 específicamente en su artículo 3 “Tipos de Proyectos o actividades”, no incluye tipología para el ingreso al Servicio de Estudio de Impacto Ambiental (SEIA) para proyectos de energía marina.

Sobre una potencial Participación Ciudadana durante la instalación y operación de un proyecto de energía marina en Chile (2), El Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental brinda a personas y organizaciones ciudadanas la información necesaria para presentar comentarios, que puedan complementar y permitan una calificación más precisa.

Otra consideración a tener en cuenta es el uso múltiple del espacio marítimo, ya que en el vasto océano se albergan intereses económicos, recreativos, de conservación ambiental, entre otros. La regulación existente permite otorgar a distintas entidades parte del espacio marítimo ubicado dentro del mar territorial (12 millas náuticas desde la costa) para su uso, resguardo, explotación y/o administración. Así, es posible encontrar Concesiones de Acuicultura, Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB), Áreas Marinas Protegidas (AMP), Espacios Costeros Marinos de los Pueblos Originarios (ECMPO, Ley Lafkenche), y más.

Actualmente la regulación impide la renovación y la tramitación de nuevas concesiones en zonas donde existan solicitudes o se hayan otorgado áreas para ECMPO. Al 2023 estos

espacios costeros alcanzan más de 200.000 hectáreas y existen más de 2 millones de hectáreas solicitadas para su administración, casi en su totalidad ubicadas desde la región del Biobío al sur. Esto sin duda podría significar un gran obstáculo al momento de solicitar concesiones en espacios marinos donde exista un potencial de instalar proyectos energéticos offshore.

Sobre seguridad y salud ocupacional durante la instalación y operación de un proyecto de energía marina en Chile (3): A partir del 2018 toda construcción, instalación, operación y mantenimiento de instalaciones debe seguir la norma ISO 45001 para la gestión de seguridad y salud de los trabajadores. Asimismo, se consideran la Ley N° 16.744 sobre seguro obligatorio contra accidentes de trabajo y enfermedades profesionales y el Decreto Supremo N° 594 sobre condiciones sanitarias y ambientales en los lugares de trabajo. En particular, para las tareas marítimas se adiciona la Ley Orgánica de la Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante y el reglamento de buceo profesional de DIRECTEMAR.

Existen varios documentos en Chile que plasman pasos y recomendaciones para la oportunidad de la energía marina para Chile. Si bien, estos no son oficiales desde el gobierno de Chile, dos de estos reportes principales se financiaron con fondos de la Embajada de Reino Unido: "Marine energy development, taking steps for developing the Chilean resource" (2013) (4) y "Recomendaciones para la estrategia de energía marina de Chile: un plan de acción para su desarrollo" (2014) (5).

En el primero se analizan diferentes aspectos para su desarrollo, desde el recurso, ambientales, industria local, políticas, hasta los aspectos sociales y ambientales. El de 2014, desarrollado por la empresa Aquatera, marcó una diferencia, brindando detalles más profundos respecto a los anteriores. Se diseñaron diferentes estrategias, en algunos casos según cada región de Chile, sugiriendo recomendaciones para una potencial integración de este tipo de proyectos en el País.

Un paso importante que realizó el estado chileno para impulsar el desarrollo de las energías marinas en nuestro país, fue la creación del primer Centro de Investigación e Innovación en Energía Marina, MERIC. El Centro surgió con el aporte de fondos públicos y privados, recibiendo un subsidio estatal de \$13MM USD. Fue impulsado por el Gobierno a través de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y el Ministerio de energía en 2015, y posteriormente la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) desde 2022. El Centro Meric ha realizado importantes esfuerzos en el desarrollo de líneas de investigación que entreguen un marco de comprensión, conocimiento y capital que pueda facilitar la entrada de este tipo de tecnologías al país.

Las líneas de I+D de MERIC están orientadas a la interacción de las tecnologías que extraen energía del mar con el ecosistema marino de Chile y la adaptación de estas tecnologías a los eventos extremos del mar y a su integración en la industria local. Para esto se dispusieron a lo largo del programa MERIC las siguientes líneas de I+D:



Figura 1. Imágenes de las portadas de los primeros reportes en Chile que analizaban el desarrollo de la energía marina en el país.

- Evaluación del recurso energético
- Corrosión marina
- Biofouling
- Percepciones humanas
- Mamíferos marinos
- Adaptación de tecnologías de energía marina a las condiciones locales
- Integración de tecnologías de energía marina a la industria local
- Modelación numérica en energía marina
- Costo nivelado de la energía marina en Chile
- Open Sea Lab: laboratorio en mar abierto con convertidor undimotriz.

Los primeros resultados de esta investigación se plasman en su Informe de 3 años (Meric, 2018)(6). Adicionalmente, se elaboraron varios reportes para vislumbrar la integración de la energía marina en Chile:

- Marine Energy, Levelised Cost of Energy (LCOE) of Marine Energy in Chile study, 2019 (7).
- Tecnologías de energía undimotriz para Chile, análisis crítico, 2021 (8)
- Tecnologías de energía eólica offshore para Chile, perspectivas y desafíos, 2024 (9).



Figura 2. Imágenes de las portadas de algunos reportes importantes realizados por el centro de investigación MERIC.

Para el caso del desarrollo de la energía eólica marina en Chile, el Ministerio de energía anunció en [marzo de este año](#) (2024) que se avanzará en una hoja de ruta para el desarrollo de la energía eólica marina, esto en conjunto con el programa Net Zero World del Departamento de Energía de Estados Unidos. Este viene a ser el primer hito oficial desde el gobierno de Chile en cuánto a temáticas de energía eólica marina.

Por otra parte, existen diversos documentos impulsados por el gobierno con enfoque en energía renovable general, en especial a través del Ministerio de Energía, más no especifican sobre la energía marina. A excepción de la “Hoja de ruta 2050, hacia una energía sustentable e

inclusiva para Chile”(10) en septiembre de 2015, en donde mencionan el potencial undimotriz de las costas de Chile y sugieren analizar próximamente la energía marina.

Por último, dentro de las acciones estatales para el impulso de las energías marinas se puede mencionar el desarrollo de las páginas web para explorar el potencial undimotriz del país, y actualmente en desarrollo, el potencial eólico offshore. Estas iniciativas, conocidas como ‘exploradores’, han sido lideradas por el Ministerio de Energía y permiten visualizar la distribución espacial y temporal de variables importantes que permiten evaluar el recurso eólico y undimotriz

(<https://marino.minenergia.cl/explorador>; <https://eolico.minenergia.cl/exploracion>).

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con las energías del mar

A nivel general, con los análisis generados en MERIC, el asesoramiento y discusiones generadas con el comité científico internacional y las conferencias y seminarios realizados en torno a las investigaciones sobre energía marina y considerando la literatura existente, a lo largo del país se identifican las siguientes características para el desarrollo de la energía marina en Chile:

Norte chico o zona central: Potencial para el desarrollo de energía undimotriz, por el gran recurso energético de las olas. Sin embargo, el fondo marino cuya profundidad aumenta significativamente y la menor disponibilidad de infraestructura portuaria y centros de consumo eléctrico podrían encarecer y complejizar el desarrollo de un proyecto.

Zona centro-sur: Alto potencial de implementar proyectos de energía undimotriz y eólica marina offshore dado el alto potencial energético de oleaje y viento, además de las zonas con una batimetría propicia y proximidad a zonas portuarias importantes y centros de consumo eléctrico como Concepción y Valdivia.

Zona sur y extremo sur: A pesar de un excelente recurso de oleaje en mar abierto frente a la costa del extremo sur, existen desafíos tecnológicos para su aprovechamiento debido a las condiciones extremas y la falta de infraestructura portuaria y centros de conexión. Sin embargo, la oportunidad de microrredes considerando a las comunidades aisladas, que suministran su energía a partir del diésel, con un alto costo y una irregularidad en su disponibilidad, se convierten en una opción posible en un mediano plazo. En esta zona también se han identificado sitios con excelente potencial para el desarrollo de la energía mareomotriz.

En Chile la energía undimotriz, presenta una vasta fuente de energía renovable para la costa Chilena de más de 4200 km de largo. En una primera aproximación al análisis del recurso energético marino en Chile por Garrad Hassan en el 2009 (11), se considera el valor mínimo de

potencial en el norte de Chile de 20 kW/m y para el extremo sur de 66 kW/m, se calculó en base a un valor medio de 39 kW/m, un potencial de energía undimotriz total de 165 GW.

Tabla 1. Valores del potencial energético undimotriz a lo largo de la costa de Chile.

References	Location	Lat	Lon	Significant height (m)	Te (s)	Average Power (kW/m)
[11]	Arica	-18,45	-70,37	1,94	-	19,57
[11]	Iquique	-20,17	-70,2	2,1	10,54	22,72
[11]	Antofagasta	-23,63	-70,42	2,27	10,41	26,33
[11]	Caldera	-27,05	-70,87	2,59	10,06	32,98
[11]	Coquimbo	-29,92	-71,37	2,71	9,81	35,32
[11]	Valparaíso	-32,98	-71,62	2,56	10,05	32,3
[12], [13]	Punta Curaumilla	-33.087	-71.746	2,26	10,5	25,83
[12], [13]	Punta Lobos	-34.412	-72.055	2,2	10,5	24,54
[11]	Constitución	-35,28	-72,52	2,81	10	38,74
[12], [13]	Loanco	-35.588	-72.657	2,34	10,9	28,81
[11]	San Vicente	-36,73	-73,25	2,96	9,97	42,83
[14]	Isla Santa María	-36,97	-73,54	2,08	12,9	41,63
[12], [13]	Punta Lavapie	-37.273	-73.677	2,37	10,5	28,34
[12], [13]	Puerto Saavedra	-38.643	-73.511	2,5	10,6	31,98
[12], [13]	Punta Falsa	-39.994	-73.707	2,46	10,4	31,14
[11]	Golfo Coronados	-41,67	-73,93	3,18	9,9	49,08
[11]	Faro Félix	-52,96	-74,07	3,71	9,25	62,21
[11]	Diego Ramírez	-56,53	-68,63	3,83	9,17	66
[11]	Isla de Pascua	-27,15	-109,45	2,65	10,31	35,38

Por otra parte, existen varios sitios con potencial para aprovechar la energía de las corrientes de mareas. Las campañas de medición realizadas por MERIC han identificado recursos

comparables o incluso superiores a aquellos de los principales proyectos de energía mareomotriz en el mundo. Destacan dos ubicaciones con velocidades de corriente máximas superiores a los 4 m/s: el Canal de Chacao y el Estrecho de Magallanes.

Canal de Chacao y Estrecho de Magallanes: Lugares emblemáticos con un excelente recurso energético para la energía mareomotriz. En particular, para el estrecho de Magallanes, resulta una opción que se podría integrar a la oportunidad de generación de hidrógeno verde, como una estrategia para complementar con un sistema de baterías, dado el limitado espacio en tierra para que pueda ser suministrado únicamente con energía eólica en tierra.

Tabla 2. Valores del potencial energético mareomotriz a lo largo de la costa de Chile.

Refs	Location	Lat	Lon	Max current speed (m/s)	Average Power density (kW/m2)	Water depth or range (m)	Width (km)	Length (km)
[15]	Chacao Channel	-41,78	-76,65	4	5	40		
[11]	Chacao Channel	-41,78	-76,65	3,5 - 4	3,5 - 5,2	30 - 100	2-5	10
[11]	Apiao	-42,628	-73,197	1,8	-	100	2	2
[11]	Corcovado Gulf	-43	-73,17	2	0,72	20 - 100	4	10
[16]	Desertores	-42,767	-72,891	4	0,9	40*	5*	7*
[11]	Darwin Channel	-45,24	-74,17	2	-	100	0,5	2
[17]	Melinka	-43,977	-73,722	2	0,86	50*	2	4
[11]	Angostura Inglesa	-48,57	-74,25	1,9	-	100	<1	1-2
[11]	Estrecho de Magallanes, Primera Angostura	-52,34	-69,4	4	3,6	50 - 70	3	14
[*]	Estrecho de Magallanes, Primera Angostura	-52,505	-69,594	5	-	80	-	-
[11]	Gabriel Channel	-54,07	-70,55	2,1	-	100	0,5 - 1,5	25

* Análisis a partir de cálculos y modelos desarrollados en la línea de investigación de MERIC: “Evaluación del Recurso”, contactar a leandro.suarez@meric.cl

En Chile, el potencial técnico estimado de la energía eólica offshore es de 957 GW, del cual el 14% corresponde a turbinas eólicas fijas al fondo, y el 86% (826 GW) a turbinas eólicas flotantes (World Bank 2020). Según estudios realizados por Mattar (2016) (18) y análisis realizado por MERIC y la Universidad Austral de Chile (9), se destaca una macrozona abarcando desde la región de Valparaíso (33° S) a Los Lagos (43° S), con una profundidad del fondo marino entre 150 a 300 m con una anchura media de 30 a 40 km, lo que lo hace más propicio para considerar tecnologías flotantes. Esta macrozona además cuenta con importante infraestructura industrial portuaria y se encuentra cercana a centros de consumo eléctrico.

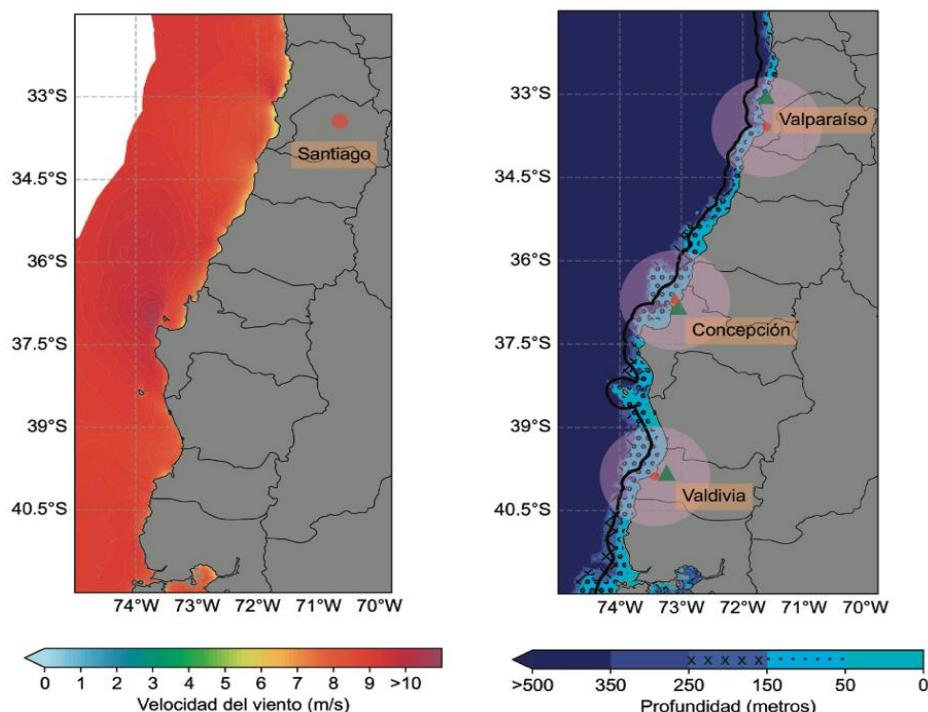


Figura 3. Zona centro y sur de Chile con: (izquierda) campo de recurso eólico offshore a 100m de altura; y (derecha) batimetría, límite de mar territorial (12 millas en línea negra), capitales regionales costeras (triángulo verde) y puertos cercanos con área de 100 km de radio (círculo rojo) (9).

En cuanto al análisis de tecnologías con convertidor de energía undimotriz en el análisis realizado por MERIC en su reporte de análisis crítico de tecnologías (8), se concluye que, considerando las condiciones presentes actualmente en Chile y el desarrollo actual de las tecnologías en el mundo, las de tipo flotante con fondeos convencionales presentan el mejor desempeño en los aspectos analizados. Esto se explica por la mayor flexibilidad en cuanto a las profundidades de instalación, ampliando la disponibilidad de sitios y reduciendo el riesgo ante eventos extremos (en particular tsunamis) y por los menores requerimientos de levante,

movilización, instalación y mantenimiento de las tecnologías, compatibles en gran parte con las capacidades disponibles actualmente en Chile.

En cuanto a las tecnologías de tipo flotante, con PTO fijo al fondo, se observa un menor desempeño económico, lo que se debe en gran parte a unos mayores costos de instalación de la base respecto a fondeos convencionales. Debido al hecho de requerir de embarcaciones especializadas o de gran capacidad de levante para su instalación o mantenimiento, se considera que su implementación actualmente no sería factible sin modificaciones importantes a su diseño o a inversiones considerables para disponer de las embarcaciones requeridas. Por su parte, las instalaciones costeras, se observa una menor viabilidad de sitios, dada principalmente por otros usos del borde costero, aunque eventualmente es posible aprovechar sinergias con obras costeras que cumplan otras funciones. Uno de los aspectos que podría constituir su mayor desventaja es un mayor riesgo ante eventos extremos, tanto tsunamis como marejadas.

En cuanto al desarrollo de un polo industrial en Chile cuyo enfoque sean las tecnologías de energía marinas, aun no es algo que se esté desarrollando, sin embargo, Chile tiene una rica tradición marítima y una infraestructura considerable con el potencial de ser utilizada en forma inmediata o convertir para desarrollos de energía marina. Junto con estudios realizados en MERIC, Fundación Chile y otros reportes existentes, se han realizado análisis de la cadena de valor considerando la cadena de suministro local, de las cuales sus principales conclusiones se detallan a continuación.

En relación a las capacidades portuarias e industriales para instalación y mantención, entre 30° y 41°S se encuentra la mayoría de los puertos y astilleros más importantes del país. Entre estos se pueden mencionar el de San Antonio y Valparaíso (región de Valparaíso), y los puertos de San Vicente y Coronel (región del Biobío). En cuanto a los astilleros, entre los de mayor tamaño y relevancia destacan ASMAR en Talcahuano (Biobío), y ASENAV en Valdivia (Los Ríos). Por otra parte se puede destacar los puertos de Puerto Montt y Punta Arenas como las bases de soporte para proyectos mareomotrices en el Canal de Chacao y el Estrecho de Magallanes, respectivamente.

Durante el estudio realizado por MERIC y Fundación Chile, con respecto al costo nivelado de energía marina para Chile (7) en el año 2018, en un período de cinco meses, se entrevistó a 42 actores de la cadena de suministro local identificadas como potenciales actores dentro de la cadena de valor en las distintas etapas de un proyecto de energía marina. Estas empresas locales están ubicadas en las siguientes ciudades: Punta Arenas, Puerto Montt, Osorno, Valdivia, Concepción, Talcahuano, Valparaíso y Santiago. El objetivo principal de visitar a estos actores fue comprender las capacidades, los costos y la experiencia relacionados con los proyectos de energía marina.

Según la clasificación de la cadena de suministro, fue posible identificar servicios y productos con mayor captura de valor local. Asimismo, fue posible reconocer los mayores desafíos para la cadena de suministro local y su impacto en CAPEX y Gasto Operacional (OPEX).

De la información anterior, se pudo identificar que los actores locales serían capaces de capturar el 60% de la cadena de valor de un proyecto. Esto es a pesar de que el desarrollo

tecnológico e I+D se encuentra fuera del país. Este alto valor de captura es producto, principalmente, de una desarrollada industria nacional de apoyo a las actividades en el mar. Se pueden destacar capacidades en las siguientes actividades: fabricación de estructuras de acero e instalación de sistemas de amarre. Ambos elementos tienen un gran impacto en el CAPEX y el resto de la vida operativa de los dispositivos.

En la Figura 4, se muestra la captura de valor en las principales 4 etapas de la cadena de valor. Dentro de las empresas con mayor contribución en la captura de valor local se pueden mencionar las empresas de servicios de anclajes y fondeos, los astilleros y servicios marítimos en general, incluyendo empresas ligadas a los estudios preliminares.

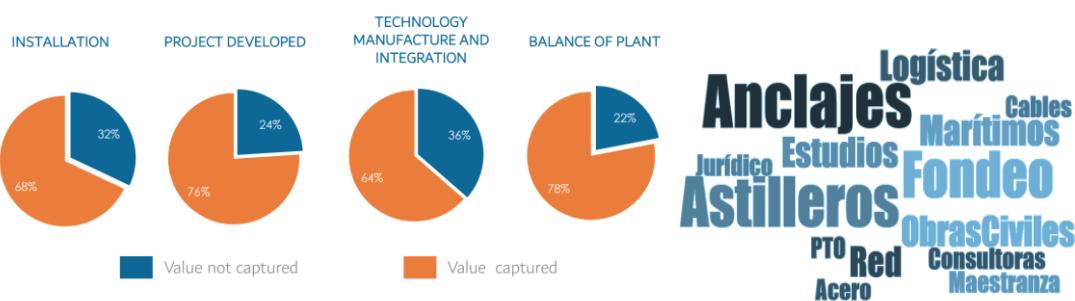


Figura 4. Análisis de la captura de valor en las 4 etapas consideradas en la cadena de valor para el desarrollo de un proyecto de energía marina.

En cuanto a desarrollos de tecnologías nacionales, ha habido alrededor de diez iniciativas para el testeo de tecnología undimotriz en las costas de Chile desde el año 2012, pero de forma temporal. En 2023, la Universidad del Bío-Bío comenzó la construcción de un WEC de absorción puntual para ser instalado cercano a la costa, llamado Lafkenewen, proyecto financiado por el gobierno regional de Bío-Bío.

El proyecto más emblemático y que se mantuvo durante dos años y medio en el mar frente a Las Cruces, fue desarrollado por MERIC y con el apoyo de Enel Green Power Chile, el llamado Laboratorio de mar abierto, u Open Sea Lab project. Este contempló la instalación de la boya PB3, en abril de 2021, de la empresa Ocean Power Technologies (19).

Con una potencia de 3kW, esta boya suministraba energía de las olas a una estación de medición oceanográfica en el mar a 1,5 kilómetros de la Estación Costera de Investigaciones Marinas (ECIM) y a una profundidad de 35 m. Esta estación oceanográfica consta de sensores sumergidos los cuales transmiten su información vía Wifi y satelital, incluyendo ADCP y CTD. Además, el Open Sea Lab contiene una estación meteorológica en tierra y un radar de banda x. A pesar de que en noviembre de 2023 la boya fue desmantelada debido al término del financiamiento del proyecto, los sensores actualmente siguen funcionando con baterías.

Este sitio, donde se ubica el Open Sea Lab, se mantiene con los permisos y regulaciones para hacer uso del espacio y con potencial para continuar con actividades experimentales. Varios

desarrolladores de tecnología del mundo se han acercado para estudiar la posibilidad de instalar su tecnología en aquel espacio.

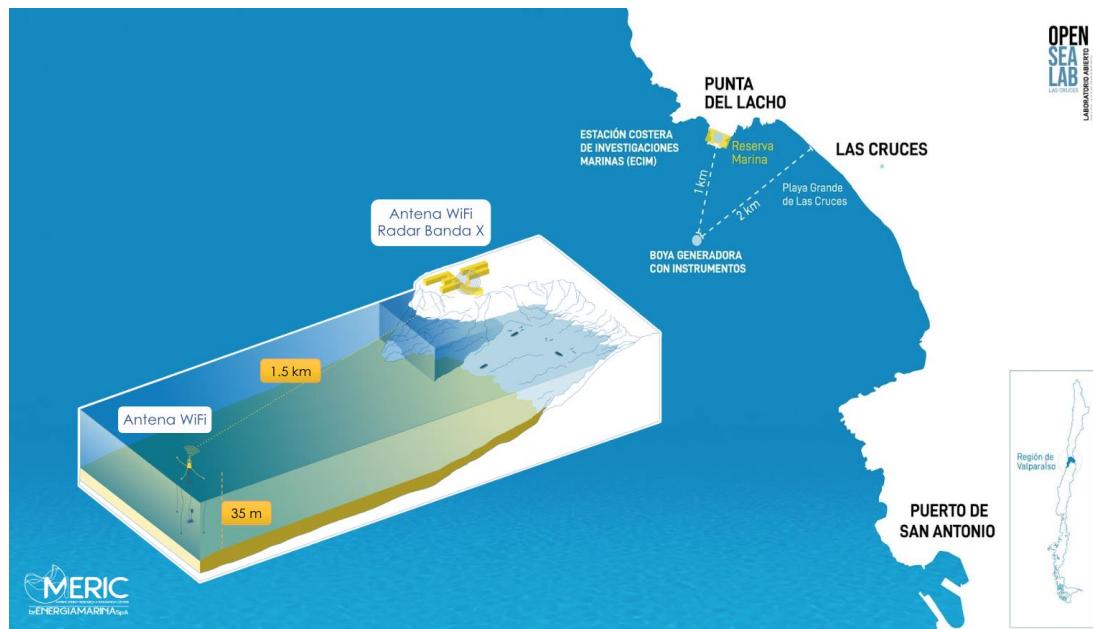
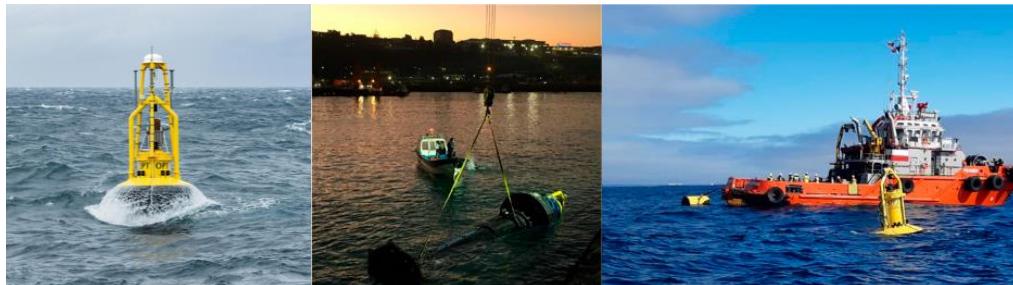


Figura 5. Imágenes el proyecto Open Sea Lab, del centro de investigación MERIC.

Por otra parte, igualmente en Chile se dispone de canales de ensayos hidrodinámicos. Se destaca en particular el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Universidad Austral, en Valdivia, dirigido por el Profesor Gonzalo Tampier, por tener las condiciones más extensas para su experimentación. Este canal de ensayos tiene dimensiones de 45x3x2 m (largo, ancho, profundidad) y un taller de modelos a escala. Cuenta con carro de remolque de aluminio que alcanza una velocidad de hasta 5 m/s y es accionado por un servomotor de 0,75kW. El canal está provisto de un generador de olas regulares en uno de sus extremos, lo que le permite la generación de olas de hasta 0,2m de altura. El canal está construido completamente en acero y es soportado libremente por un sistema de apoyos, en prevención de movimientos sísmicos. Este ensayo celebró su aniversario número 50 en septiembre de 2023.



Figura 6. Canal de ensayos hidrodinámicos de la Universidad Austral de Chile.

Adicionalmente, una de las principales líneas de investigación del Centro MERIC se centra en el Laboratorio de Corrosión Marina y Biofouling. Establecido en 2016, este espacio se dedica a estudiar el desgaste y deterioro de estructuras metálicas en ambientes acuosos o húmedos, como el agua de mar y la colonización de estas superficies por micro y macro organismos (biofilms y biofouling). Estas instalaciones se encuentran en la Estación Costera de Investigaciones Marinas (ECIM) en Las Cruces, perteneciente a la Pontificia Universidad Católica de Chile. ECIM es un referente en investigación y colaboración en ecología marina a nivel mundial, con una trayectoria que se remonta a 1982. Sus instalaciones, reconocidas internacionalmente, cuentan con modernos laboratorios, muy bien equipados.

Los laboratorios de ECIM son esenciales para estos estudios, ofreciendo mediciones precisas relacionadas con variables como temperatura, pH y salinidad, así como pruebas de estrategias anti-fouling, entre ellas, pinturas y distintos materiales. El equipamiento disponible, que incluye principalmente, una lancha de investigación, además, de microscopios, estereoscopios, balanzas de alta precisión y estanques de agua de mar, facilita análisis tanto electroquímicos como biológicos.



Figura 7. Laboratorios de Corrosión Marina y Biofouling del Centro de Investigación MERIC en ECIM, Las Cruces.

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de nuevas energías renovables

Quién desarrolla estos temas en Chile es la Comisión Nacional de Energía (CNE) el cual es un organismo público y descentralizado, que se relaciona con el Presidente de la República por intermedio del Ministerio de Energía. Si bien no se ha encontrado bibliografía para una normativa que considere específicamente energías renovables, la CNE ha desarrollado las siguientes normativas técnicas:

- [Norma técnica de seguridad y calidad de servicio](#)
- [Norma técnica de conexión y operación de pmgd en instalaciones de media tensión](#)

Por otra parte desde el Coordinador Eléctrico Nacional, quien es un organismo técnico e independiente, encargado de la coordinación de la operación del conjunto de instalaciones del Sistema Eléctrico Nacional que operen interconectadas entre sí, dentro de su reporte ["Hoja de Ruta para una Transición Energética Acelerada"](#) (2024) (20), se plasma sobre las normas técnicas y estándares:

“Es fundamental actualizar la norma técnica que establece estándares y requerimientos técnicos para la infraestructura basadas en electrónica de potencia. La gran mayoría de los proyectos renovables variables instalados en el sistema y los que se encuentran en fase de construcción utilizan IBR, basados en tecnología de inversores convencional, denominados seguidores de red (grid-following), los cuales presentan limitaciones para aportar servicios de red típicamente entregados por la generación síncrona convencional, la que irá desapareciendo en el tiempo.

Es necesario definir e incorporar nuevos conceptos para evaluar la robustez de la red, desarrollar estándares y requerimientos mínimos para las fuentes renovables del futuro, así como actualizar los existentes a estándares modernos, de modo que incorporen requerimientos para tecnología del tipo grid-forming que, se espera, permitiría aportar los atributos entregados por la generación síncrona.

Se requiere flexibilizar la normativa en los aspectos relacionados con la operación y servicios de red, de modo de optimizar la asignación de recursos de forma oportuna y más eficiente.”

En términos de la capacidad y funcionamiento de la red eléctrica, en la actualidad, Chile está relativamente bien abastecido hacia las zonas costeras. Hasta hace algunos años, la red eléctrica del país estaba dividida en 4 sistemas separados. Esto cambió luego de la Ley de Transmisión Eléctrica (2016) que reorganizó el sistema de transmisión eléctrica para facilitar la integración de la ERNC a la red. Desde entonces, la red se compone de 3 sistemas separados. La distancia entre los puntos de conexión puede ser de cientos de kilómetros, y muchas de las comunidades más remotas en la costa chilena no están conectadas a una red eléctrica.

Estos sistemas son el SEN (Sistema Eléctrico Nacional), SEA (Sistema Eléctrico de Aysén) y el SEM (Sistema Eléctrico de Magallanes. El SEN es el principal sistema, con una línea de transmisión de 500 [kV] con una extensión total de 3.100 km lineales y 34.522 km de líneas de transmisión, con una capacidad instalada superior a los 24 GW. Mientras que el SEA y el SEM componen sólo un 1% de la capacidad nacional. Abastecen puntos geográficos de menor extensión y se encuentran aislados del resto del país. Alrededor de estos sistemas, al sur de Chile, es donde se encuentran la mayoría de las comunidades aisladas. En total, cerca a un 1% de la población en Chile, se encuentra aún desconectada de la red eléctrica. Para resolver este problema, pequeños sistemas han sido subvencionados para cada comunidad.

En los últimos 10 años se han realizado varios cambios positivos en Chile, ya sea en el mercado eléctrico y en los sistemas regulatorios, para fomentar el desarrollo de energías renovables, como por ejemplo:

- Actualmente pequeños generadores pueden participar del mercado eléctrico.
- Se implementaron exenciones parciales o totales para los peajes por uso de sistemas de transmisión de proyectos de energía renovable no convencional (ERNC) de menor escala.
- Todas las compañías que venden energía a los usuarios están obligadas a proveer un porcentaje de la energía vendida desde fuentes de ERNC.

Por otra parte, de acuerdo a la Política Energética Nacional, 2022 (21):

Los avances en energías renovables han sido considerables, pero se reconoce la necesidad de avanzar en la integración de otras tecnologías que aún no han sido masivamente incorporadas, como lo son la solar de concentración de potencia (CSP), la geotermia y el almacenamiento de energía en sus diversas formas, continuando con la investigación en nuevas formas de energía y tecnologías. Para lograrlo, es necesario modernizar la regulación de generación, transmisión y distribución eléctrica, así como de la producción y transporte de nuevos combustibles cero emisiones, y también la flexibilidad necesaria en el sistema, de forma que puedan continuar integrándose energías renovables, nuevas tecnologías y el desarrollo de un sistema resiliente.

Actualmente se ha puesto gran relevancia a la implementación de proyectos de almacenamiento de energía, debido a importantes pérdidas de energía renovable, las que sobrepasaron los 2.400 GWh durante el primer semestre de 2024. Para esto se considera una meta al 2050, en la que al menos existan 6.000 MW de sistemas de almacenamiento de energía en el Sistema Eléctrico Nacional (al menos 2.000 MW al 2030), tales como baterías, bombeo hidráulico, aire comprimido, aire líquido, entre otras tecnologías. Para avanzar en esta temática, en noviembre de 2022 se dictó la Ley de Almacenamiento de Energía Eléctrica y Electromovilidad, que entre sus principales características, está que habilitará que los proyectos de almacenamiento, es decir, aquellos sistemas que no están asociados a centrales de generación, se les pague por inyectar energía al sistema eléctrico y por estar disponibles en los momentos de mayor demanda.

Desde el reporte del Ministerio de Energía, Planificación energética de largo plazo (22), se remarca sobre los desafíos de la operación del sistema eléctrico. Con la entrada masiva de energías renovables variables (solar fotovoltaica y eólica), sumado al retiro progresivo y cada vez más rápido de las centrales a carbón, además de la menor disponibilidad hidroeléctrica por la escasez hídrica, suponen grandes desafíos en la operación del sistema eléctrica en términos de mantener la estabilidad y seguridad del mismo, utilizando nuevas tecnologías coherentes con el largo plazo.

Se requerirá la adopción de nuevas tecnologías, como almacenamiento, aporte a través de inversores electrónicos de potencia, condensadores sincrónicos, etc., lo que debe atenderse con la urgencia que merece esta solución habilitadora hacia un desarrollo carbono neutral. Digitalización, proyectos piloto, alianzas entre organismos, serán clave en los próximos años.

Para mejorar las proyecciones energéticas a largo plazo, considerando altos niveles de inserción de fuentes de generación renovable variable, es relevante considerar las condiciones de seguridad de la red. Por ello, las proyecciones han modelado de mejor manera el almacenamiento, la generación gestionable y las restricciones operativas de seguridad del sistema para dotar de más flexibilidad a la red, entregando claras señales de inversión en el país y sentar las bases de la modernización del sector eléctrico, en particular, su operación.

Con respecto a los nuevos planes de expansión, de acuerdo al Coordinador eléctrico nacional, se propone una expansión de la transmisión, en el proceso de planificación de la transmisión en 2024 (23). Se considera como base el cronograma oficial de retiro de unidades a Carbón comprometidas para el período 2020-2029 a través de acuerdo público-privado entre el Ministerio de Energía y empresas propietarias de las instalaciones.

Una completa revisión del estado actual de la red eléctrica de Chile y su desarrollo al futuro se presenta el estudio *Present and Future of the Chilean Electrical Grid* (Díaz et al., 2020) (24).

4. Documentación relativa a energías del mar en Chile

Chile		
Num	Nombre del documento	Contenido del documento
1	1_MERIC_Guia_normativa_ambiental	Guías Metodológicas Ambientales realizan un análisis preliminar y/o pre factibilidad para Proyectos de Energía Marina en Chile, en términos de la regulación ambiental.
2	2_Compendio_Normativa_PAC_06.2019	Diagnóstico preliminar, identifica requerimientos que la ciudadanía podría tener frente a escenarios de desarrollo de proyectos de Energía Marina y en la instancia de evaluación ambiental del proyecto.
3	3- Compendio_Normativa_SSO_Agosto_2019.pdf	Diagnóstico preliminar que identifica la normativa asociada a la SST (Salud y Seguridad en el Trabajo) identificando obligaciones y riesgos dentro de las distintas etapas (construcción, instalación, operación y mantenimiento) de este tipo de proyecto en Chile.
4	4_BID_Marine_Energy_Report	Marine Energy Development, Taking steps for developing the Chilean resource
5	5_Recomendaciones_para_la_Estrategia_de_Energia_Marina_de_	Recomendaciones para la estrategia de energía marina de Chile: un plan de acción para su desarrollo.
6	6_REPORT 2015-2018 MERIC	Resultados de los primeros 3 años del programa MERIC, en cada una de sus líneas de investigación.
7	7_Summary -LCoE Report FCH-MERIC	Marine Energy, Levelised Cost of Energy (LCOE) of Marine Energy in Chile study, 2019.
8	8_TECNOLOGIAS DE ENERGIA UDIMOTRIZ PARA CHILE	Tecnologías de energía undimotriz para Chile, análisis crítico, 2021

9	9_Tecnologias-energiamarina-eolicaoffshore-paraChile	Tecnologías de energía eólica offshore para Chile, perspectivas y desafíos, 2024.
10	10_hoja_de_ruta_cc_e2050	Hoja de ruta 2050, Hacia una energía sustentable e inclusiva para Chile. Página 188.
11	11_2009_garrad_hassan_chilean_marine_energy_resources	Selección preliminar de sitios, recursos energéticos marinos en Chile
12	12_2017 Lucero Wave energy assessment in the central-south coast of Chile	Assessment of wave energy resource in nearshore waters along the central coast of Chile
13	13_2020Perspectives for harnessing the energetic persistent high swells	Evaluación del clima de oleaje entre latitudes 33°S y 40,5°S.
14	14_2018Azares_EnergíasRenovablesEnIslaSantaMaría	Uso de energías renovables en Isla Santa María para reducir su dependencia de los combustibles fósiles
15	15_2017 Guerra et al	Caracterización del recurso energético en el Canal de Chacao, Chile
16	16_The impact of spring-neap tidal-stream cycles in tidal energy	Evaluaciones de los ciclos de marea en el mar interior de Chile
17	17_Garcia_2009-01 Gen de energ x corrientes - Melinka v2010	Generación de energía por corrientes de marea en Chile, una aplicación al caso de Melinka
18	18_mattar2016	Simulación de energía eólica marina utilizando WRF en la costa central de Chile
19	19_Cortes2022-10-01249	Open Sea Lab: Un observatorio oceánico integrado, energizado con energía undimotriz
20	20_Hoja-de-ruta-2024-v1_coordinadorelectrico	Hoja de ruta para una Transición Energética Acelerada, 2024
21	21_pen_2050-_actualizado_marzo_2022_0	Política energética nacional, 2022

22	22_20220630_men_pelp_iaa2022	Planificación energética de largo plazo, 2022
23	23_Informe-PET-2024-Version-23012024	Propuesta de expansión de la transmisión. Proceso de planificación de la transmisión, 2024
24	24_24_Díazetal2020_RedElectricahilena	Hoja de Ruta para una Transición Energética Acelerada

5. Conclusiones finales y recomendaciones

El impulso otorgado por el Gobierno de Chile al Centro MERIC ha sido crucial para destacar el enorme potencial del país en la implementación de tecnologías de energía marina. Este avance se debe tanto al significativo recurso energético identificado como a la creación de capacidades humanas multidisciplinarias en diversas áreas de investigación y aplicaciones tecnológicas. Estas áreas incluyen ecosistemas biológico-químicos, trabajo con comunidades costeras, evaluación de recursos energéticos, identificación de infraestructura y suministro, viabilidad económica y aplicaciones industriales.

A través del intercambio con diversos actores, incluyendo la participación en redes regionales, comités organizativos de centros de investigación y entidades expertas en energías renovables offshore, así como en talleres con expertos internacionales y conferencias, se han identificado oportunidades para integrar la energía marina renovable en el país, alineadas con las necesidades y proyecciones de Chile.

Las oportunidades en la región europea difieren de las de Iberoamérica. En esta región, las prioridades se orientan hacia la pobreza energética y la escasez hídrica, enfocando la innovación tecnológica hacia estas áreas. Aunque Chile cuenta con una matriz energética con un alto porcentaje de renovables no convencionales, actualmente se prioriza la mejora de la eficiencia en la captura de recursos como el viento y el sol, y en el almacenamiento energético. Esto significa que las energías renovables marinas aún no tienen un papel protagónico en la matriz energética nacional, pero ofrecen oportunidades para integrarse en estrategias que aborden temas prioritarios para el país.

Se prevé que la incorporación de las Energías Marinas Renovables en Chile no será a través de una conexión masiva a la red eléctrica central, sino más bien a través de proyectos específicos, como microrredes o plataformas marinas que sirvan a comunidades aisladas o nichos de mercado específicos, como la acuicultura y la industria del hidrógeno verde, o bien, para contribuir de manera estratégica al cumplimiento de los objetivos de descarbonización del país, disminuyendo la presión sobre sus espacios en tierra. Además, se recomienda considerar proyectos demostrativos que, si bien, puedan estar validados en otros mares, en Chile pueden enfrentar desafíos distintos.

En este contexto, se han identificado escenarios donde las energías marinas presentan una alternativa con costos competitivos ante necesidades actuales de sectores industriales y públicos, tales como:

Acuicultura Offshore: Chile, reconocido como el segundo mayor productor de salmón a nivel mundial, contribuye con el 12% de la producción acuícola global. Esta industria representa un valor estimado de 4 billones de dólares y se proyecta un crecimiento del 17,4% en toneladas para el año 2025.

Actualmente, en Chile existen aproximadamente 1.500 concesiones acuícolas, de las cuales al menos 400 están operativas y dependen en gran medida del petróleo para satisfacer sus necesidades energéticas, que fluctúan entre 4 y 715 MWh. Estos niveles de consumo energético se encuentran dentro de los rangos que podrían ser cubiertos por la actual tecnología de generación de energía marina.

Para mantener su competitividad y responder a la creciente demanda de producción acuícola de manera sostenible, el sector acuícola chileno debe seguir la tendencia global y trasladarse hacia zonas marinas más alejadas de la costa (offshore). Esto requiere una reinención de las metodologías de producción para adaptarlas a entornos marinos abiertos. En este contexto, las energías marinas emergen como soluciones viables para satisfacer las necesidades energéticas de estas operaciones, desempeñando un papel fundamental en la transición hacia aguas abiertas.

Abastecimiento en áreas Remotas: En Chile, el 1% del territorio nacional no está conectado a la red eléctrica principal. Esta brecha en el suministro de energía se cubre principalmente mediante generadores que funcionan con diésel, lo que implica no sólo un alto costo del combustible, sino también gastos adicionales de transporte, tanto terrestre como marítimo. Esta situación afecta especialmente a las comunidades costeras, que además enfrentan un acceso limitado a sistemas de mitigación en caso de desastres naturales.

La implementación de energías marinas renovables, integradas en sistemas de microrredes eléctricas autónomas e independientes, podría ofrecer una solución viable y sostenible para satisfacer las necesidades energéticas de estas áreas no conectadas. Este enfoque, basado en un modelo de negocio innovador, tiene el potencial de abordar la pobreza energética en estas zonas, proporcionando un suministro de energía más confiable y sostenible.

Desalación de Agua de Mar: Un estudio del Instituto de Recursos Mundiales ha identificado a Chile como una de las naciones con mayor riesgo de disminuir sus fuentes de agua potable, debido a la combinación del aumento de temperaturas y cambios en los patrones de precipitaciones. La obtención de agua es una prioridad global, y los métodos conocidos para incrementar la disponibilidad de agua más allá del ciclo hidrológico natural incluyen la desalinización y la reutilización.

En este contexto, los dispositivos de energía undimotriz o eólica offshore emergen como soluciones prometedoras para satisfacer las necesidades de agua potable en regiones aisladas o costeras, especialmente cuando se integran con plantas desalinizadoras. Estos sistemas pueden

operar de manera directa o indirecta, aprovechando la energía generada para el proceso de desalinización.

Un ejemplo destacado es el proyecto del desarrollador canadiense Oneka, cuyos dispositivos deslizadores tienen un flujo de agua promedio de 10 m³ por unidad, cantidad suficiente para abastecer a una residencia durante un mes. Esta tecnología podría reemplazar el suministro de agua convencional en comunidades costeras aisladas, ajustando el número de dispositivos según las necesidades específicas.

Mirando hacia el futuro, la integración de estas tecnologías podría ofrecer soluciones a la creciente demanda de agua dulce y abrir mercados para satisfacer las necesidades urgentes de agua en diversos sectores industriales de Chile, como la minería (primer productor mundial de cobre y segundo de litio) y la agroindustria.

Impulso del Hidrógeno Verde en Chile: Con el valor más bajo de Costo Nivelado de Hidrógeno Verde esperado para el 2030, en combinación con alto factor de capacidad, Chile se ha posicionado como uno de los países favoritos para la producción de hidrógeno en el mundo.

Según la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde del Ministerio de Energía de Chile (Noviembre 2020), se prevé que para el año 2030, el hidrógeno verde producido en el Desierto de Atacama y en la Región de Magallanes tendrá uno de los costos de producción más bajos a nivel mundial. Esta ventaja competitiva ha motivado el desarrollo de dos proyectos pioneros de hidrógeno verde en dichas regiones, representando una oportunidad significativa para la integración de energías renovables en el proceso de producción.

Un caso de éxito en la integración de energía marina con otras fuentes renovables para la producción de hidrógeno verde es el proyecto Big Hit en Escocia, Reino Unido (<https://www.bighit.eu/>). En este proyecto, la combinación de un aerogenerador de 0.9 MW y una turbina de corriente de mareas de 2 MW resultó en un aumento del tiempo de producción de hidrógeno y una reducción en los costos. Esta experiencia ofrece un modelo valioso que podría ser adaptado y replicado en Chile, aprovechando las condiciones locales y las ventajas específicas de la región para la producción de hidrógeno verde.

Energía Eólica Offshore Flotante: La energía eólica offshore puede contribuir de manera sustancial al cumplimiento de los objetivos de descarbonización del país, disminuyendo la presión sobre sus espacios en tierra y aprovechando su vasto territorio marítimo.

El plan de descarbonización busca reemplazar las fuentes de generación a base de carbón por energía renovable al 2040. Sin embargo, las limitaciones de espacio en tierra con condiciones propicias para la generación de energía eólica, sumado a los conflictos socioambientales por coexistencia con otras actividades productivas y espacios urbanos, dificultan que la capacidad instalada proyectada al 2030, alcance el 40% de la demanda esperada.

Por esto, sumado al importante potencial eólico marino observado, se prevé que la energía eólica offshore pueda alcanzar un importante desarrollo en el futuro.

Referencias

- [1] GUÍA PRACTICA DE NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE EN CHILE. Energía Marina & centro Tecnológico MERIC
- [2] COMPENDIO DE NORMATIVA CHILENA ASOCIADA A LA PARTICIPACIÓN CIUDADANA DURANTE LA INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE UN PROYECTO DE ENERGÍA MARINA EN CHILE. Claudia Muñoz Palma. Energía Marina & centro Tecnológico MERIC. 2019
- [3] COMPENDIO DE NORMATIVA CHILENA ASOCIADA A LA SALUD Y SEGURIDAD OCUPACIONAL DURANTE LA INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE UN PROYECTO DE ENERGÍA MARINA EN CHILE. Claudia Muñoz Palma. Energía Marina & centro Tecnológico MERIC
- [4] MARINE ENERGY DEVELOPMENT, TAKING STEPS FOR DEVELOPING THE CHILENIAN RESOURCE. British Embassy in Chile, Errázuriz & Asociados Ingenieros, University of Edinburg, Chilean Law Firm Guerrero, Olivos, Novoa y Errázuriz.
- [5] RECOMENDACIONES PARA LA ESTRATEGIA DE ENERGÍA MARINA EN CHILE: UN PLAN DE ACCIÓN PARA SU DESARROLLO. Aquaterra Limited. Stromness Business Centre .2014
- [6] THREE YEARS PROMOTING THE DEVELOPMENT OF MARINE RENEWABLE ENERGIE IN CHILE 2015-2018. MERIC Marine Energie Research & innovation Center. Energia Marina SpA. 2019
- [7] MARINE ENERGY LEVELISED COST OF ENERGY (LCOE) OF AMRINE ENERGY IN CHILE STUDY. FCH Fundación Chile. MERIC.
- [8] TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ PARA CHILE. ANÁLISIS CRITICO. Gonzalo Tampier, Cristian Cifuentes, Carlos Parra. MERIC. White paper. 2021.
- [9] TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE PARA CHILE. PERSPECTIVAS Y DESAFÍOS. Gonzalo Tampier Brockhaus, Cristian Cifuentes Salazar, Natalia Azares Aguayo, Rosana Cardenas Cartes, Katherine Álvarez Castillo. 2024.
- [10] HOJA DE RUTA 2050 HACIA UNA ENERGÍA SUSTENTABLE E INCLUSIVA PARA CHILE. Comité Consultivo De Energía 2050. 2015.
- [11] PRELIMINARY SITE SELECTION – CHILEAN MARINE ENERGY RESOURCES. J. Cruz, M.D. Thomson, E. Stavrulia. 2009.
- [12] WAVE ENERGY ASSESSMENT IN THE CENTRAL-SOUTH COAST OF CHILE. Felipe Lucero, Patricio A. Catalán, Alvaro Ossandon, José Beyá, Anders Puelma, Luis Zamorano. Renewable Energy. 2017
- [13] PERSPESTIVES FOR HARNESSING THE ENERGETIC PERSISTENT HIGH SWELLS REACHING THE COAST OF CHILE. Ottavio Mattia Mazzaretto, Felipe Lucero, Giovanni Besio, Rodrigo Cienfuegos. Renewable Energy. 2020.
- [14] USO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN ISLA SANTA MARÍA PARA REDUCIR SU DEPENDENCIA DE COMBUSTIBLES FOSILES. Natalia Azares Aguayo. 2018
- [15] TIDAL ENERGY RESOURCE CHARACTERIZATION IN CHACAO CHANNEL, CHILE. Maricarmen Guerra, Rodrigo Cienfuegos, Jim Thomson, Leandro Suarez. International Journal of Marine Energy. 2017.
- [16] HE IMPACT OF SPRING-NEAP TIDAL-STREAM CYCLES IN TIDAL ENERGY ASSESSMENTS IN THE CHILEAN INLAND SEA. Osvaldo Artal, Oscar Pizarro, Héctor H. Sepúlveda. Renewable Energy. 2019.

- [17] GENERACIÓN DE ENERGÍA POR CORRIENTES DE MAREA EN CHILE, UNA APLICACIÓN AL CASO DE MELINKA. Rolando Garcia Vilardino, Patricio Winckler Grez. Grupo de Ingeniería Civil Oceanica. 2009.
- [18] OFFSHORE WIND POWER SIMULATION BY USING WRF IN THE CENTRAL COAST OF CHILE. Cristian Mattar, Dager Borvarán. Renewable Energy. 2016.
- [19] OPEN SEA LAB: AN INTEGRATED COASTAL OCEAN OBSERVATORY POWERED BY WAVE ENERGY. Jaime Cortés, Felipe Lucero, Leandro Suarez, Cristian Escauriaza, Sergio A. Navarrete, Gonzalo Tampier, Cristian Cifuentes, Rodrigo Cienfuegos, Daniel Manriquez, Barbara Parragué, Nicole Osiadacz, Randy Finke. Journal of Marine Science and Engineering. MDPI. 2022
- [20] HOJA DE RUTA PARA UNA TRANSICIÓN ENERGÉTICA ACELERADA, VISIÓN DEL COORDINADOR ELÉCTRICO NACIONAL. Coordinador Eléctrico Nacional Chileno. Octubre 2024.
- [21] TRANSICIÓN ENERGÉTICA DE CHILE. POLÍTICA ENERGÉTICA NACIONAL. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. Marzo 2022.
- [22] PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA DE LARGO PLAZO 2018-2022. INFORME DE ACTUALIZACIÓN DE ANTECEDENTES 2022. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. Junio 2022.
- [23] PROPUESTA DE EXPANSIÓN DE LA TRANSMISIÓN. PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LA TRANSMISIÓN 2024. José Araneda V., Nicolás Cáceres G., Miguel Flores R., César Guerrero S., Phillip Guerra N., Felipe Ruiz V., Rodrigo Torres I., Piero Izquierdo A., Stephanie Carvacho S. Gerencia Planificación y Desarrollo de la Red. Enero 2024.
- [24] PRESENT AND FUTURE OF THE CHILEAN ELECTRICAL GRID. Fabián Díaz, Marco Rivera, Héctor Chávez, Patrick Wheeler. 2020.

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN COLOMBIA

Andrés Fernando Osorio Arias(CEMARIN)
Rubén Darío Montoya Ramírez (Universidad de Medellín)
Aymer Maturana (Universidad del Norte)
William López Castrillón (Universidad de América Bogotá)

1. Políticas energéticas en energías del mar

En Colombia, la regulación de las energías renovables marinas se encuentra en una fase inicial, con un marco normativo que, aunque ha avanzado en general hacia la promoción de las energías renovables, aún carece de directrices específicas para el uso del territorio oceánico. A continuación, se presentan los aspectos más relevantes sobre la situación actual de las políticas energéticas relacionadas con las energías marinas en el país.

Colombia ha implementado varias leyes y documentos que buscan incentivar el uso de energías renovables. La Ley 1715 de 2014 fue la primera iniciativa significativa, introduciendo incentivos fiscales y arancelarios para promover la generación de energía a partir de fuentes renovables. Esta ley fue actualizada en 2021 con la Ley 2099, que incluyó disposiciones para la transición energética y el dinamismo del mercado energético. Más recientemente, la Ley 2294 de 2023 ha fortalecido el marco regulatorio, aunque no aborda específicamente las energías marinas.

Con la ley 1715 de 2014, Colombia avanza hacia la transición energética mediante la cual se promueve una mayor competencia y masificación de energías renovables no convencionales y la adopción de nuevas tecnologías. Dentro de estas tecnologías se incluyen las energías obtenidas a partir de fuentes renovables de los mares y océanos tales como las mareas, el oleaje, las corrientes marinas, los gradientes térmicos, los gradientes salinos entre otros. Según esta ley el gobierno pondrá en marcha instrumentos para fomentar e incentivar los trabajos de exploración e investigación de los mares con el fin de conocer el recurso para aprovechamiento de la energía de los mares en el país. A nivel mundial las energías renovables han tomado mucho auge en las últimas décadas, dentro de estas energías las energías asociadas con los recursos marítimos y costeros han evolucionado como una fuente de energía con valores de potencial muy superiores a los obtenidos con otras fuentes energéticas como la solar, la eólica o inclusive la energía hidroeléctrica convencional a partir de grandes plantas hidroeléctricas. Las cifras hablan de un potencial de 8000-80000 TWh, para energía del oleaje, 800 TWh para energías a base de corrientes marinas y energía hidrocinética en ríos.

A pesar de estos avances, Colombia carece de lineamientos claros sobre la regulación del uso del territorio oceánico. Existen algunas políticas que abrieron las puertas a las energías marinas y otras políticas generales sobre recursos bioceánicos y transición energética pero no se han desarrollado normas específicas que regulen las energías renovables marinas.

El Plan de Desarrollo "Prosperidad para Todos" (2010-2014), incluyó la promoción de energías renovables y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que sentó las bases para la política actual de energías marinas.

El Plan de Desarrollo "Todos por un Nuevo País" (2014-2018), continuó la promoción de energías renovables y la adaptación al cambio climático, incluyendo la explotación de energías marinas.

El Documento CONPES 3990 Colombia potencia bioceánica sostenible 2030 incluye a los océanos como activo estratégico de la nación. El citado documento estableció acciones asociadas a la evaluación del potencial de hidrocarburos (gas y petróleo) costa afuera. Lo anterior, contribuye al fortalecimiento de la autosuficiencia energética; al crecimiento económico.

El CONPES 4075 de Transición Energética, establece los lineamientos para la transición energética en Colombia, incluyendo la promoción de energías renovables como la energía marina.

La Política Nacional de Cambio Climático, busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la adaptación al cambio climático, lo que incluye la explotación de energías marinas como una fuente de energía limpia.

Ley 1931 de 2018, establece las directrices para la gestión del cambio climático en Colombia y menciona la importancia de las energías renovables (la cual incluye las energías marinas).

Es importante mencionar que, si bien algunos de estos documentos normativos no se enfocan exclusivamente en las energías marinas, sí las mencionan como una opción importante para la transición energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en Colombia.

Hoja de Ruta para Energías Renovables

En cuanto a la planificación, Colombia no cuenta oficialmente con una hoja de ruta específica para las energías renovables marinas. Sin embargo, se han elaborado hojas de ruta para otras tecnologías, como la energía eólica costa afuera y el hidrógeno verde, en colaboración con entidades internacionales. Estas iniciativas están alineadas con el Plan Nacional de Desarrollo, que prevé el desarrollo de al menos seis hojas de ruta adicionales para diferentes tecnologías renovables. Sin embargo, su publicación ha enfrentado retrasos significativos.

La hoja de ruta para la energía eólica costa afuera, desarrollada en conjunto con el Banco Mundial, es un ejemplo positivo en este sentido. Por otro lado, estudios académicos han comenzado a delinejar potenciales rutas para el desarrollo de energías renovables marinas en Colombia.

Proyecciones y Capacidades Instaladas

A nivel político, hay un claro interés por aumentar la participación de fuentes no convencionales en la matriz energética colombiana. Sin embargo, los detalles sobre las proyecciones específicas en megavatios (MW) instalados para energías renovables marinas aún no están claramente definidos en los planes oficiales. Hasta ahora, solo se ha formalizado la hoja de ruta para proyectos eólicos costa afuera.

Impulso a la Cadena de Valor

En términos de medidas concretas para potenciar la cadena de valor de las energías del mar, se han establecido pliegos de condiciones para la primera ronda de energía eólica costa afuera en Colombia. Estos documentos especifican los requisitos y criterios necesarios para la ocupación temporal del espacio marino. Sin embargo, más allá de estas iniciativas iniciales y algunas reuniones sectoriales, no se han implementado acciones robustas por parte del gobierno que promuevan un desarrollo integral del sector.

En resumen, aunque Colombia ha realizado avances significativos en el marco normativo y ha comenzado a explorar el potencial de las energías renovables marinas, todavía queda mucho por hacer para establecer un entorno regulatorio claro y efectivo que fomente su desarrollo sostenible y competitivo.

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con las energías del mar

En Colombia, el desarrollo de energías renovables marinas enfrenta desafíos significativos, aunque se han identificado recursos con importantes potenciales y se están llevando a cabo investigaciones relevantes. A continuación, se presenta un análisis detallado sobre los recursos, la capacidad industrial y las instalaciones experimentales relacionadas con la energía del mar en el país.

El documento: "Hoja de ruta para el desarrollo de la eólica marina y de las energías del mar en Colombia" publicado por The Renewables Consulting Group (RCG), una empresa del Grupo ERM, a través de un contrato con el Banco Mundial, presenta de manera el diagnóstico actual y las futuras líneas de desarrollo de la energía mariana offshore en Colombia. Según este documento la costa de Colombia en el Caribe tiene abundantes recursos eólicos marinos energéticos con un recurso potencial técnico total estimado en 109 GW. Las velocidades del viento, particularmente en la región de La Guajira, exceden consistentemente los 10 metros por segundo (ver Figura.1) y los factores de capacidad neta estimados para proyectos representativos (cuánta electricidad podrían producir en comparación con su potencial total teórico) se acercan al 70% y son entre los más altos del mundo.

Sin embargo, dicho potencial marino no es plenamente aprovechable dada las restricciones impuestas por diferentes aspectos tales como áreas protegidas, hábitats críticos y sensibilidades ambientales, zonas de explotación pesquera por pesquerías comerciales y artesanales, y las tierras son importantes para las comunidades indígenas. Además, existen áreas asignadas para actividades hidrocarburíferas, así como rutas muy transitadas por el transporte marítimo. Teniendo en cuenta las limitaciones ambientales, sociales y técnicas, el desarrollo potencial se estima en alrededor de 50 GW, equivalente a 2,8 veces la capacidad de generación total existente en el país. La Figura 2, muestra las áreas de explotación de eólica marina.

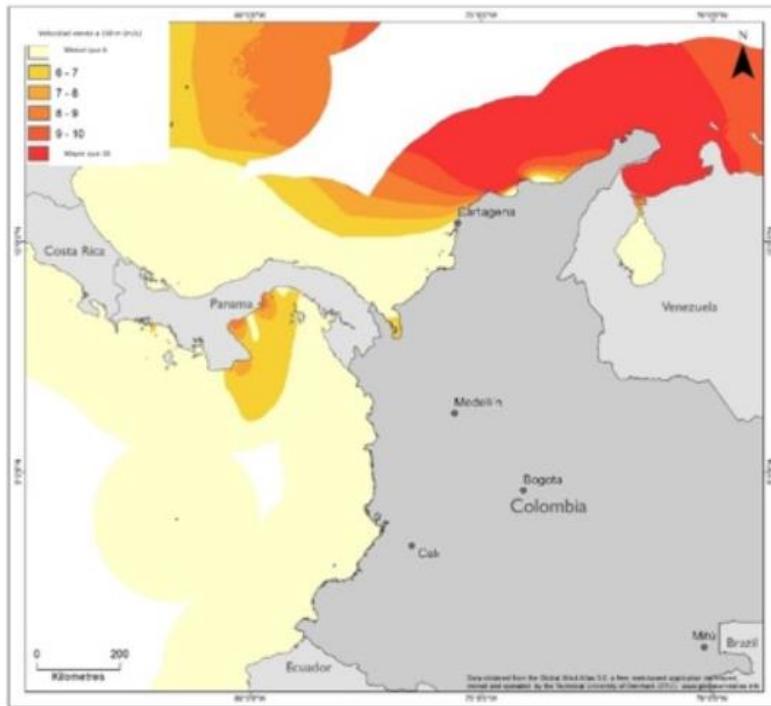


Figura 1. Mapa del potencial eólico costa afuera de Colombia. Fuente: Hoja de ruta para el desarrollo de la eólica marina y de las energías del mar en Colombia”.



Figura 2. Mapas de áreas de exploración inicial para energía eólica marina. Fuente: Hoja de ruta para el desarrollo de la eólica marina y de las energías del mar en Colombia” publicado por The Renewables Consulting Group.

Como puede observarse la costa caribeña de Colombia ha mostrado un potencial significativo para la instalación de parques eólicos marinos. Investigaciones como las de Rueda-Bayona et al. (2019) han proporcionado datos sobre la densidad de viento en ubicaciones estratégicas a lo largo de la costa.

Otros recursos Energéticos Marinos

Colombia cuenta con un amplio potencial en recursos energéticos marinos que aún no ha sido completamente aprovechado. Publicaciones científicas han identificado diversas fuentes de energía, incluyendo:

- Energía undimotriz: Estudios han resaltado el potencial del oleaje en regiones como el Pacífico colombiano, donde las condiciones son favorables para la generación de energía a partir de las olas.
- Corrientes de marea: La evaluación del potencial de energía mareomotriz ha sido objeto de análisis, especialmente en zonas costeras donde las corrientes son más intensas.
- Gradientes salinos y térmicos: La investigación sobre energía térmica oceánica (OTEC) y energía por gradiente salino ha comenzado a tomar forma, con estudios que indican que el Caribe colombiano podría ser un lugar viable para estas tecnologías.

A modo de ejemplo, La Figura 3, muestra resultados obtenidos por algunos autores para el potencial de energía undimotriz en el Caribe obtenidos por Appendini et al.(2015).

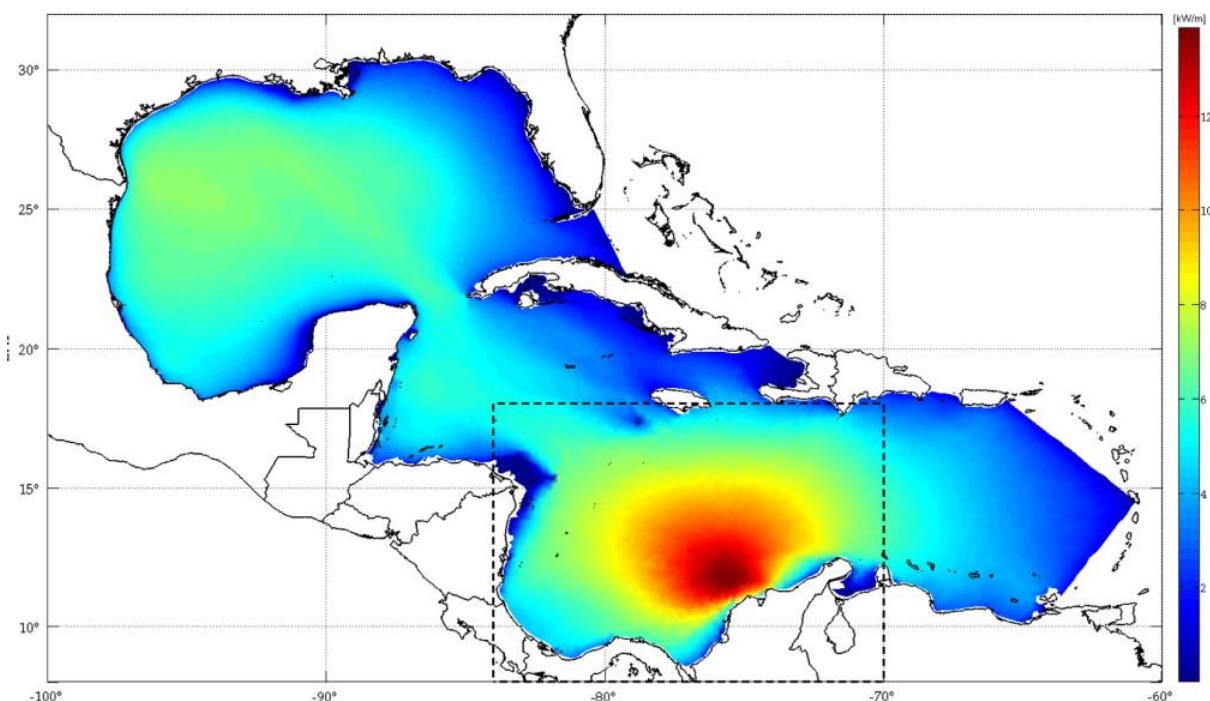


Figura 3. Potencial de energía del oleaje para el Caribe de largo plazo (1979-2008). Tomado de Appendini et al. (2008).

A pesar de la identificación de estos recursos, no existe un documento consolidado que compile todos los estudios realizados hasta la fecha. Sin embargo, varios artículos científicos han abordado el potencial específico de cada recurso y las áreas geográficas más prometedoras para su desarrollo, presentados en las referencias al final de la sección.

La siguiente tabla resume los potenciales y cita las referencias correspondientes.

Tabla 1. Potencial de Energía Marina en Colombia. Modificado de Shadman et al 2023

Recurso	Potencial	Unidad	Referencia
OTEC - SAI $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ Depth: 400-800m Dist: 7 km	9.5 – 40* (Tech)	MW	[1], [2], [4], [7]
OTEC - Santa Marta $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ Depth: 400-750m Distance: 16 km	10** in average. (Tech)	MW	[2], [4], [7]
Salinity gradient – Magdalena River	15,157 (Theory) 780 (Tech)	MW	[3]
Salinity gradient - Canal Dique	154 (Theory)	MW	[3]
Salinity gradient – León River	187 (Theory)	MW	[3]
Salinity gradient – Atrato River	126 (Theory)	MW	[3]
Wave - Barranquilla	6	kW/m	[4]
Wave - Santa Marta	5	kW/m	[4]
Wave – north Pacific (Chocó -Nuquí)	Up to 4	kW/m	[4], [11]
Wave – South Pacific Nuquí y San Juan	Up to 3	kW/m	[4], [11]
Tides (San Juan - Buenaventura)	Up to 2.6	kW/m	[4], [9]

* Para flujos de agua caliente entre 22 and 90 m³/s. (Técnico).

** Para flujos de agua caliente de 10 m³/s. (Técnico)

Capacidad Industrial

En cuanto a la capacidad industrial para desarrollar tecnologías marinas, Colombia aún está en una etapa temprana. Aunque no existe una infraestructura industrial consolidada para las energías marinas, hay instituciones que están comenzando a desempeñar un papel crucial:

- COTECMAR: Esta empresa se especializa en investigación científica y tecnológica en el ámbito marítimo. Su experiencia en diseño y construcción de plataformas navales personalizadas puede ser un activo valioso para el desarrollo de tecnologías relacionadas con energías renovables marinas.
- INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras) y CEMARIN (Centro de Excelencia en Ciencias del Mar) son centros que realizan investigaciones fundamentales sobre los recursos marinos, proporcionando datos que pueden influir en políticas públicas y decisiones sobre el manejo sostenible del medio ambiente marino.

A pesar de estas iniciativas, la falta de una capacidad industrial escalada limita el avance hacia un desarrollo robusto del sector energético marino.

Instalaciones Experimentales

Actualmente, no hay instalaciones experimentales dedicadas exclusivamente a tecnologías marinas en Colombia. Sin embargo, se están llevando a cabo proyectos relevantes en este sentido, como el *Programa de Desalinización Acoplada a Energía de Gradiente Salino*. Este programa, desarrollado por la Universidad del Norte y la Universidad Nacional de Colombia, incluye la construcción de un sistema piloto para generación de energía por gradiente salino con una capacidad prevista de 150 W. Este proyecto se ubicará en la desembocadura del río Magdalena hacia el Mar Caribe, específicamente en Bocas de Ceniza, Atlántico. Los objetivos del programa también abarcan evaluar la eficiencia energética y analizar los impactos ambientales generados por sistemas acoplados.

En conclusión, aunque Colombia tiene un gran potencial para el desarrollo de energías renovables marinas, aún enfrenta desafíos significativos en términos de regulación, infraestructura industrial y capacidades experimentales. La investigación continua y la colaboración entre instituciones académicas y empresas son fundamentales para avanzar hacia un futuro energético sostenible basado en los recursos marinos del país.

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de nuevas energías renovables

La situación de la red eléctrica en Colombia en relación con la integración de energías renovables es un tema de creciente relevancia, especialmente ante el auge de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER). A continuación, se presenta un análisis detallado sobre el estado actual de la red eléctrica, los desafíos que enfrenta y las iniciativas en curso para facilitar la integración de energías renovables, incluyendo las marinas.

Actualización de los Códigos de la Red Eléctrica

Desde 2015, la Unidad de Promoción Minero-Energética (UPME) ha trabajado en la promoción de condiciones favorables para la integración de FNCER a través del financiamiento del Fondo para el Medio Ambiente Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo. Este esfuerzo incluye el análisis de barreras existentes y la formulación de propuestas normativas. Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, no se ha establecido un marco normativo detallado que contemple estándares específicos para la integración de energías renovables en la red eléctrica colombiana.

Recientemente, una tesis de grado desarrollada por Denis Jimena Conejo Nieto y Johan David Carrillo ha revisado el impacto de la alta integración de fuentes de energía renovable en la calidad del suministro eléctrico. Este tipo de estudios es fundamental para entender cómo las energías renovables pueden afectar variables críticas como la distorsión de señales eléctricas y su impacto en la estabilidad del sistema.

Situación Actual del Sistema Eléctrico

El Sistema Eléctrico Nacional (SIN) en Colombia abarca aproximadamente 28,428 km de líneas de transmisión, que incluyen tanto líneas nacionales como regionales. Este sistema cubre alrededor del 40% del territorio nacional y satisface las necesidades energéticas del 97% de la población. Sin embargo, muchas zonas costeras no urbanas dependen de sistemas regionales o locales, lo que limita su acceso a una infraestructura eléctrica robusta.

Las regiones como La Guajira y Urabá presentan desafíos significativos debido a su conexión incompleta con el SIN. En estas áreas, se utilizan pequeños sistemas alimentados por combustibles fósiles y tecnologías solares fotovoltaicas. Para integrar eficientemente recursos marinos renovables en estas regiones, es esencial contar con una infraestructura adecuada que permita la transmisión eficiente de energía.

El Plan de Expansión del SIN busca abordar estos desafíos mediante la mejora y expansión de las líneas de transmisión. Proyectos como el "Colectora 500 kV" están destinados a facilitar la integración de más de 2.8 GW de energía renovable al sistema, lo cual es crucial para el desarrollo futuro del sector energético colombiano. La Figura 4, muestra la configuración

de la red eléctrica del Sistema interconectado Nacional (SIN) según la Unidad de Planeación Minero energética UPME.

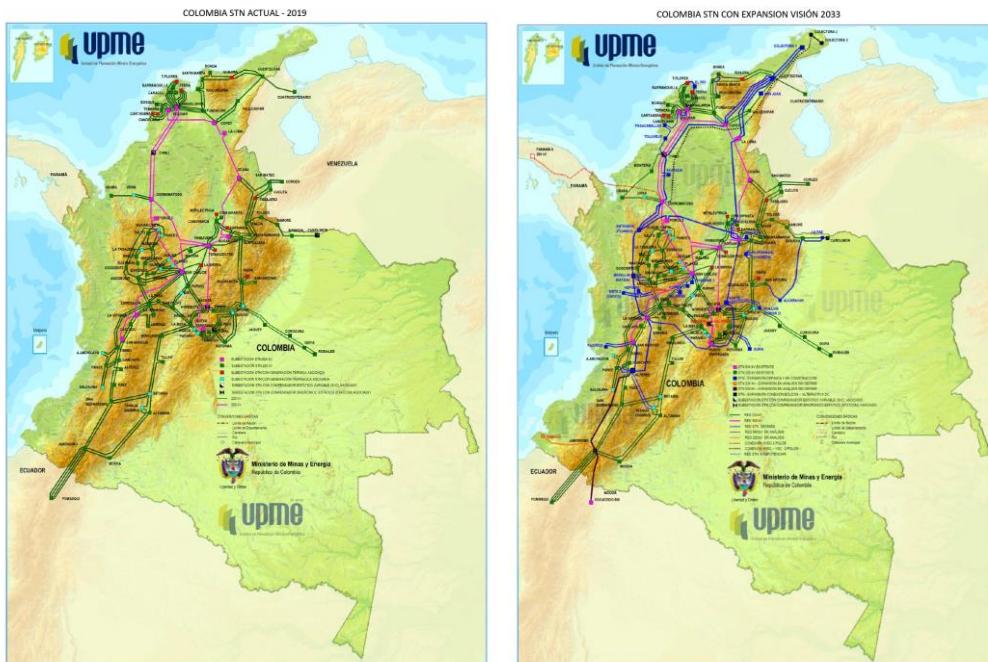


Figura 4. Esquema Sistema Internconectado Nacional. Fuente: UPME.

Desafíos y Soluciones Propuestas

Uno de los principales desafíos para la integración efectiva de energías renovables marinas es la infraestructura existente. Las comunidades dispersas en áreas costeras enfrentan limitaciones debido a restricciones ambientales y a la falta de conexión con el SIN. Sin embargo, se están considerando soluciones innovadoras como microrredes que podrían satisfacer las necesidades locales sin depender completamente del sistema centralizado.

Adicionalmente, se han identificado problemas relacionados con la calidad del suministro eléctrico debido a la alta penetración de fuentes intermitentes como la eólica y la solar. Esto subraya la necesidad urgente de actualizar los estándares técnicos y normativos para garantizar una integración segura y eficiente.

En conclusión, la situación actual del sistema eléctrico colombiano presenta tanto oportunidades como desafíos en relación con la integración de energías renovables. Aunque existen iniciativas prometedoras y proyectos en marcha para mejorar la infraestructura y facilitar esta transición, es vital continuar desarrollando un marco normativo claro que apoye el crecimiento sostenible del sector energético. La colaboración entre entidades gubernamentales, académicas e industriales será fundamental para superar las barreras existentes y aprovechar al máximo el potencial energético marino del país.

4. Conclusiones finales y recomendaciones

A la luz del análisis realizado sobre los recursos renovables, las capacidades industriales y las políticas energéticas actuales en Colombia, se pueden proponer varias medidas políticas y modificaciones al plan energético que podrían mejorar la situación en términos de suministro energético, sostenibilidad, aumento de capacidad tecnológica y aceptación social de nuevas tecnologías energéticas.

Medidas Políticas Propuestas

1. *Desarrollo de un Marco Normativo Integral:* Es fundamental establecer un marco normativo claro y específico para la integración de energías renovables marinas. Esto incluiría la creación de estándares técnicos y regulaciones que faciliten la conexión de estas fuentes al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). La legislación debe abordar aspectos como la ocupación del espacio marino, criterios ambientales y procedimientos para la obtención de permisos.
2. *Incentivos Fiscales y Financieros:* Ampliar los incentivos fiscales establecidos en la Ley 1715 de 2014 para incluir específicamente proyectos de energías renovables marinas. Esto podría incluir deducciones impositivas adicionales, subsidios para investigación y desarrollo, y financiamiento preferencial para proyectos piloto que utilicen tecnologías innovadoras.
3. *Fomento a la Investigación y Desarrollo (I+D):* Incrementar la inversión en I+D relacionada con tecnologías marinas a través de asociaciones con universidades e institutos de investigación. Se deben fomentar programas que evalúen el potencial energético de recursos como el oleaje, corrientes marinas y gradientes térmicos y salinos. La creación de un fondo específico para energías renovables marinas podría ser una vía efectiva para financiar estos esfuerzos.
4. *Educación y Capacitación:* Implementar programas educativos y de capacitación dirigidos a profesionales del sector energético sobre las tecnologías renovables marinas. Esto no solo aumentaría la capacidad técnica del país, sino que también generaría conciencia sobre los beneficios ambientales y económicos de estas tecnologías entre los futuros líderes del sector.

Modificaciones al Plan Energético

1. *Integración de Energías Renovables en el Plan Nacional de Desarrollo:* Es crucial que el Plan Nacional de Desarrollo incluya metas claras y cuantificables para la integración de energías renovables marinas en la matriz energética nacional. Esto debería ir acompañado de un cronograma específico para el desarrollo e implementación de proyectos relacionados.
2. *Expansión de Infraestructura Eléctrica:* Priorizar el desarrollo y modernización de la infraestructura eléctrica, especialmente en regiones costeras donde se prevé un alto potencial para energías renovables marinas. Esto incluye no solo la construcción de

nuevas líneas de transmisión, sino también la actualización tecnológica de las existentes para manejar fuentes intermitentes como la energía eólica marina.

3. *Desarrollo de Microrredes:* Promover el establecimiento de microrredes en comunidades costeras dispersas que puedan integrar fuentes locales de energía renovable, como sistemas solares fotovoltaicos o eólicos pequeños, junto con tecnologías marinas cuando sea viable. Esto mejoraría el suministro energético local y facilitaría una transición más suave hacia sistemas más sostenibles.
4. *Participación Comunitaria y Aceptación Social:* Incluir a las comunidades locales en el proceso de planificación y desarrollo de proyectos energéticos. La creación de foros comunitarios donde se discutan los beneficios y desafíos asociados con las energías renovables marinas puede aumentar la aceptación social. Además, es vital implementar estrategias que aseguren que las comunidades se beneficien directamente del desarrollo energético a través de empleos locales y participación en los ingresos generados por estos proyectos.

La integración efectiva de energías renovables marinas en Colombia requiere un enfoque multifacético que aborde tanto las barreras normativas como las necesidades tecnológicas e industriales. Al implementar estas medidas políticas y modificar el plan energético nacional, Colombia podría avanzar hacia un futuro más sostenible, mejorando su suministro energético, aumentando su capacidad tecnológica y fomentando una mayor aceptación social hacia nuevas tecnologías energéticas. La combinación de recursos naturales abundantes con un marco regulatorio adecuado podría posicionar al país como un líder en energías renovables en América Latina.

Referencias

- [1] J. Arias-Gaviria, A. F. Osorio, and S. Arango-Aramburo, “Estimating the practical potential for deep ocean water extraction in the Caribbean,” *Renew. Energy*, vol. 150, pp. 307–319, May 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.12.083.
- [2] A. Devis-Morales, R. A. Montoya-Sánchez, A. F. Osorio, and L. J. Otero-Díaz, “Ocean thermal energy resources in Colombia,” *Renew. Energy*, vol. 66, no. 2014, pp. 759–769, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.01.010.
- [3] O. Alvarez-Silva and A. F. Osorio, “Salinity gradient energy potential in Colombia considering site specific constraints,” *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 737–748, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.08.074.
- [4] A.F. Osorio, S. Ortega, and S. Arango-Aramburo, “Assessment of the marine power potential in Colombia,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 966–977, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.057.
- [5] M. Shadman et al., “A Review of Offshore Renewable Energy in South America: Current Status and Future Perspectives,” *Sustainability*, vol. 15, no. 2, p. 1740, Jan. 2023, doi: 10.3390/su15021740.

- [6] World Bank Group and Energy Sector Management Assistance Program, "Offshore Wind Technical Potential in Colombia," Washington DC, 2020.
- [7] J. Herrera, H. Hernández-Hamón, L. Fajardo, N. Ardila, A. Franco, and A. Ibeas, "Colombian Caribbean Bathymetry for an OTEC System Location," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 4, p. 519, Apr. 2022, doi: 10.3390/jmse10040519.
- [8] M. Roldan-Carvajal et al., "Salinity gradient power by reverse electrodialysis: A multidisciplinary assessment in the Colombian context," *Desalination*, vol. 503, p. 114933, May 2021, doi: 10.1016/j.desal.2021.114933.
- [9] J. G. Rueda-Bayona, J. L. García Vélez, and D. M. Parrado-Vallejo, "Effect of Sea Level Rise and Access Channel Deepening on Future Tidal Power Plants in Buenaventura Colombia," *Infrastructures*, vol. 8, no. 3, p. 51, Mar. 2023, doi: 10.3390/infrastructures8030051.
- [10] J. G. Rueda-Bayona, A. Guzmán, and J. J. C. Eras, "Wind and power density data of strategic offshore locations in the Colombian Caribbean coast," *Data Br.*, vol. 27, p. 104720, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.dib.2019.104720.
- [11] M. Eelsalu, D. Aramburo, R. Montoya, A. Osorio, and T. Soomere, "Spatial and Temporal Variability of Wave Energy Resource in Eastern Pacific from Panama to the Drake Passage", doi: 10.2139/SSRN.4462339.
- [12] Oscar Alvarez-Silva; Aymer Y. Maturana; Carlos A. Pacheco-Bustos; Andrés F. Osorio, Effects of water pretreatment on the extractable salinity gradient energy at river mouths: the case of Magdalena River, Caribbean Sea, *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy* (2019) 5:227–240 , <https://doi.org/10.1007/s40722-019-00141-y> <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40722-019-00141-y>
- [13] Luis Mendoza-Zapata, Aymer Maturana-Córdoba, Ricardo Mejía-Marchena, Anggie Cala, Joseph Soto-Verjel, Salvador Villamizar, Unlocking synergies between seawater desalination and saline gradient energy: Assessing the environmental and economic benefits for dual water and energy production., *Applied Energy*, Volume 351, 2023, 121876, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121876>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923012400>
- [14] Anggie Cala, Aymer Maturana-Cordoba, Joseph Soto-Verjel, Exploring the pretreatments' influence on pressure reverse osmosis: PRISMA review., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188 (2023) 113866, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113866> [https://authors.elsevier.com/sd/article/S1364-0321\(23\)00724-4](https://authors.elsevier.com/sd/article/S1364-0321(23)00724-4)
- [15] Ricardo Mejía-Marchena, Aymer Maturana-Cordoba, Stefany Fernandez-Rojano, Unveiling the enhancing potential of water pretreatment on energy efficiency in reverse electrodialysis systems - A comprehensive review, *Journal of Water Process Engineering*, 56, (2023) 104548, ISSN: 22147144, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104548>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714423010681?dgcid=coautor>.

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN COSTA RICA

Rodrigo Rojas Morales (Instituto Costarricense de la Energía)
Melissa Piedra Lascarez (Universidad Nacional a Distancia)

Costa Rica se ubica en el cinturón tropical de América Central, cuenta con una superficie marina de 589 683 km², esto es 10 veces más extensa que el territorio continental (51 100 Km²) (Figura 1). La historia de las energías marinas, en esta economía emergente, sigue el modelo de desarrollo eléctrico el cual es 100% dependiente del aprovechamiento de fuentes de energía terrestre y cuyo detalle se presenta en la Figura 2.

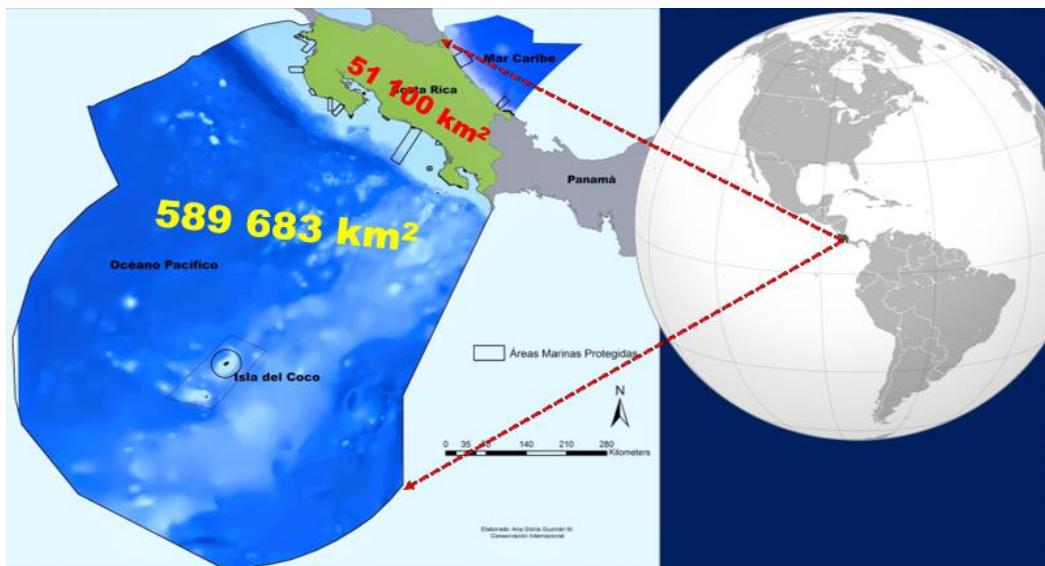


Figura 1. Ubicación geográfica y extensión marino continental de Costa Rica.

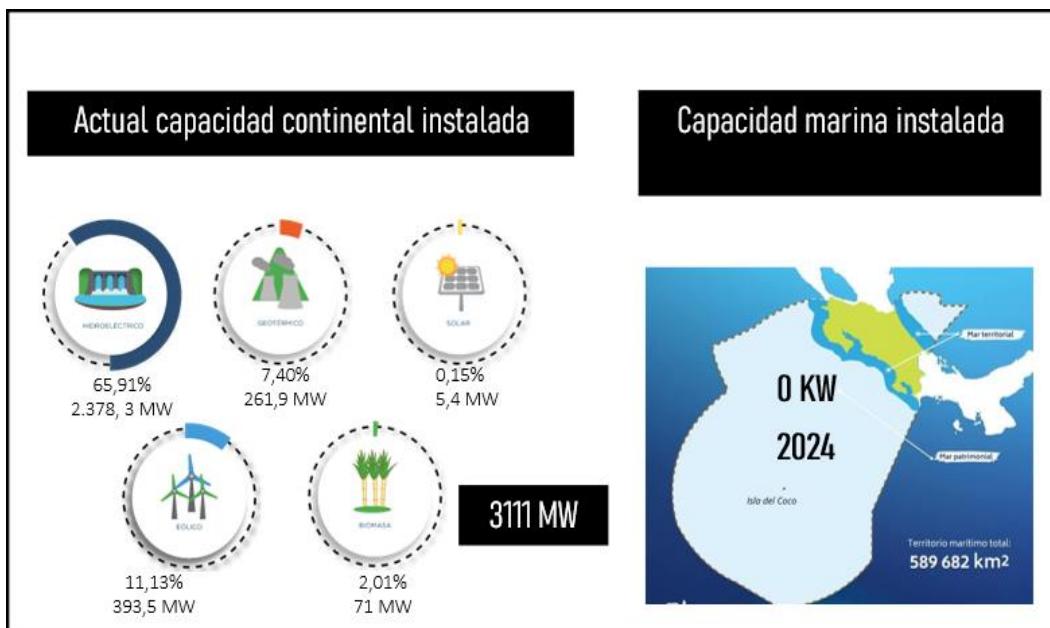


Figura 2. Matriz de energías renovables continentales vs marinas

Oportunidad con el aprovechamiento de energía marina en Costa Rica

El futuro aprovechamiento de las energías oceánicas, en Costa Rica, depende de tres factores fundamentales. El crecimiento anual de la demanda de energía, el aumento del costo de la electricidad por el efecto del incremento de generación térmica y la estrategia nacional para la electrificación renovable de la economía. Sobre la demanda eléctrica, en Costa Rica crece a tasas anuales cercanas al 4%. Para cubrir dicha necesidad el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ha establecido como política y como modelo de desarrollo eléctrico, la utilización de fuentes de generación renovables, fundamentalmente de origen continental. Dicho modelo reduce (no elimina) la dependencia externa de hidrocarburos, así como los efectos debidos al aumento de gases efecto invernadero e incremento del calentamiento global. Sin embargo, las posibilidades del país para satisfacer esa demanda creciente, con fuentes limpias, se han visto limitadas debido a imposiciones o reservas legales o sociales y restricciones propias de los potenciales que se encuentran en áreas protegidas por leyes nacionales e internacionales.

Por otro lado, la progresiva gravedad de los efectos ambientales, económicos y sociales, derivados del cambio climático, exigen a las naciones impulsar de forma significativa y permanente, nuevas fuentes de energía renovable y sostenible que cubran la demanda del país. Procurar esta resiliencia energética, requiere el impulso de alternativas no tradicionales, como las energías marinas. Lograr esta diversificación electro-energética, solo es viable si hay transformaciones en la forma en que usamos la energía, en esto Godínez-Zamora et al., (2020), concluyen que, para mantener la ruta de la descarbonización, de la economía de Costa Rica, se deben aprovechar fuentes no convencionales que tiene el país en la tierra y el mar. Para responder a este escenario, resulta fundamental avanzar con investigaciones de base sobre el ciclo de proyectos y cadena de valor y concretar el aprovechamiento energético que ofrece el mar y en especial la energía del viento marino cuyo despliegue mundial ya es tendencia (Huckerby et al., 2016 e IRENA, 2019).

Un primer paso, ineludible, lo constituye la determinación del potencial existente olas, mareas, corrientes, gradientes térmicos y el viento marino y bajo esta perspectiva, el océano surge como una gran oportunidad para respaldar, fortalecer y complementar el potencial energético nacional conocido. Considerando el mar Caribe y el Océano Pacífico, nuestro país cuenta con aproximadamente 1200 kilómetros de líneas costeras, un aspecto positivo hacia la factibilidad del desarrollo de iniciativas para la extracción de energía del mar. Es de esperar por lo tanto que con las tecnologías actuales puedan darse, en el mediano o largo plazo, las condiciones que conduzcan a la construcción y operación de desarrollos energéticos marinos.

Cronología de investigaciones y el aprovechamiento de energía marina en Costa Rica

Los principales hitos relacionadas con energía del mar en Costa Rica tienen como origen la academia, no solo por las numerosas investigaciones, sobre aspectos meta-oceánicos y energía del mar, sino porque hay estudios específicos sobre su aprovechamiento, los detalles cronológicos a continuación:

AÑO	TÍTULO	AUTOR
1997	Diseño y evaluación de un modelo hidráulico a escala para captación de energía undimotriz en la costa del Pacífico de Costa Rica	Mata, Alonso
	Determinación del potencial teórico de energía undimotriz en la costa Pacífico norte de Costa Rica	Zumbado González, Javier 1997-
2001	Las mareas en Costa Rica	Bolaños, Luis M. Murillo
2007	Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica	Lizano, O.
2009	Elaboración de Mapas de Recurso Eólico en Costa Rica. Universidad de Costa Rica, Vicerrectoría de Investigación, San Pedro de Montes de Oca.	Centro de Investigaciones Geofísicas
	Diseño de un sistema mecánico para obtener energía de los mares en un rango de potencia teórica entre los 75W y los 4kW	Arce Díaz, Luis Alonso Mora Vargas, Adolfo Ernesto, Odio Narvaéz, María Ximena
2010	Condiciones meteorológicas y oceanográficas en el Pacífico norte de Costa Rica y playa Junquillal. WWF/UNA. 22	Ballesteros, D., J.P. Salazar, R. Quesada and A. Fonseca
2012	Prefactibilidad técnica y financiera para el diseño de una planta de energía mareomotriz en Costa Rica	Cubillo, Josué
2013	Determinación del Potencial de Energía Marina para Generación Eléctrica en Costa Rica.	Brito e Melo, Ana
	Estudio preliminar de la geomorfología litoral y aspectos oceanográficos costarricenses para determinar posibles áreas de interés para explotar en un futuro la energía marina	Alvarado, Guillermo.
	Estudios científicos de hábitat marino costero y situación socioeconómica del Pacífico Norte de Costa Rica. San José-Costa Rica. 236 págs.	BIOMARCC-SINAC-GIZ.
2014	Dinámica atmosférica y oceánica en algunos sitios del Área de Conservación Guanacaste (ACG).	Lizano, O. y E. Alfaro.
	Aprovechamiento de energía marina en las zonas marítimo costeras delimitadas entre la frontera norte y la desembocadura del río Barranca	Baldi, Lenny
2016	Estimación del factor pico del espectro frecuencial JONSWAP para la costa Pacífico, con base en mediciones de oleaje en Puerto Caldera y Cabo Blanco.	López, Luis

	Marine Energy in Costa Rica: Development procedures compared to the UK	Hernandez-Madrigal, et al
	Assessing wave power for sustainable development in Costa Rica	Castro, Mariano
2017	Estudio de dinámica del oleaje en el litoral Pacífico de Costa Rica: metodologías de regionalización y avances en servicios relativos al clima marítimo.	Alfarro, H
2018	Determinación del Potencial de Energía Marina para Generación Eléctrica de Costa Rica. Centro Nacional de Planificación y Desarrollo Eléctrico. ICE. San José. Costa Rica.	Instituto Costarricense de Electricidad
2019	Caracterización de los parámetros de oleaje de la costa Pacífico de Costa Rica a partir de mediciones instrumentales	Quirós, José
	Evaluación de las ecuaciones para el cálculo de run up y run down mediante modelado físico bajo las condiciones típicas de oleaje en el litoral Pacífico costarricense.	Corrales, Manuel
2020	Wave characteristics on the Pacific coast of Costa Rica for energy production. Unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y de Estuarios	Govaere, G., Alfarro, H. y Corrales, M.
	e.Wave: Maximization of wave energy harvesting through the integration of an adaptative mechanical system regulated by sea conditions for point absorber wave energy converters	Adrián Hernández#, Julio Rojas Gomez#1 Juan Guerrero Fernández*3 Christopher Vega Sánchez
	Considerations for Offshore Wind Turbine Design in the North Pacific of Costa Rica	Montenegro, Mariana
2021	Estudio de identificación proyecto eólico marino Punta Descartes	Instituto Costarricense de Electricidad
	Determinación del potencial teórico de energía undimotriz en la costa Pacífico norte de Costa Rica.	Zumbado, J.
	Wave and tidal energy in Costa Rica: status and future perspectives of an untapped renewable resource	Rojas, Rodrigo
2022	Hoja de ruta de energía eólica marina de Costa Rica	Instituto Costarricense de Electricidad
2023	Diseño y evaluación de un modelo hidráulico a escala para captación de energía undimotriz en la costa del Pacífico de Costa Rica	Mata, Alonso
	Estudio y adaptación del diseño de un rompeolas para captar la energía que es redirigida y aprovecharla en la generación de electricidad	Piedra, Melissa
2024	Wave energy assessment and wave converter applicability at the Pacific coast of Central America	Corrales, M. George Lavidas, Andrea Lira-Loarca y Giovanni Besio

1 Políticas energéticas en energías marinas/renovables

Dominio y uso del mar territorial

De acuerdo con la Constitución Política de Costa Rica, el Estado ejerce una soberanía completa y exclusiva sobre sus aguas territoriales, extendiéndose doce millas desde la línea de bajamar a lo largo de sus costas, así como sobre su plataforma continental y base insular. También tiene jurisdicción especial sobre los mares adyacentes a su territorio dentro de un área de doscientas millas desde la misma línea. Esta jurisdicción tiene por objeto proteger, conservar y explotar exclusivamente los recursos y riquezas naturales de las aguas, suelos y subsuelos de esas zonas, bajo los principios del derecho internacional (Art. 6). En la Figura 3, se muestra un mapa con el mar territorial y el mar patrimonial de Costa Rica. En Costa Rica, en el sentido estricto, no existe marco legal o políticas habilitantes para el desarrollo de energía marina, sin embargo, se cuenta con una estructura legal que avala el aprovechamiento de energías renovables no convencionales, por lo tanto, también de energías oceánicas.

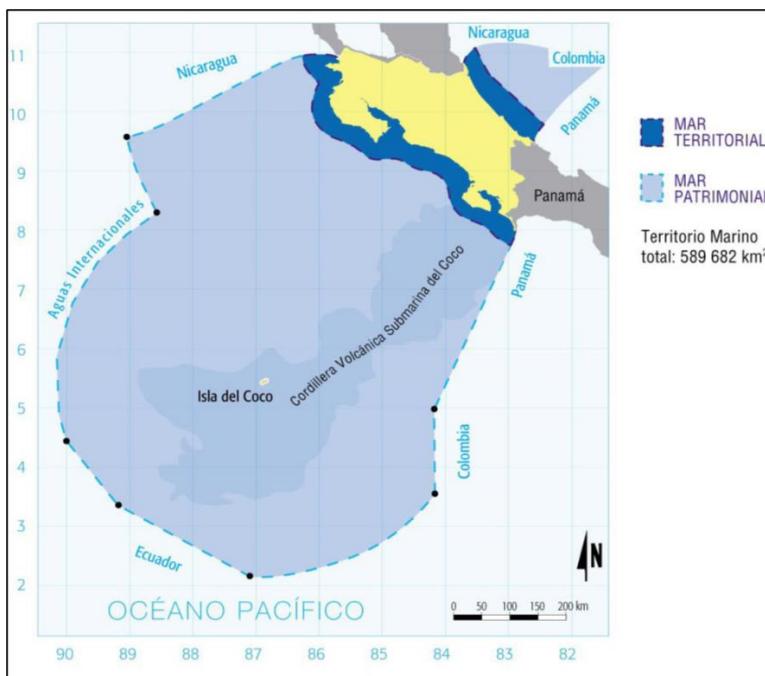


Figura 1. Zona Económica Exclusiva de Costa Rica

Las aguas marinas adyacentes a nuestras costas gozan de una especial tutela legal establecida en la Constitución Política pero también en diferentes leyes y que se caracteriza por un régimen de “dominio público”. Así lo establece la Ley de Aguas (No. 276 de 27 de agosto de 1942), que indica en su artículo 1 que son “aguas de dominio público las de los mares territoriales en la extensión y términos que fije el derecho internacional”. Las aguas marítimas son un bien demanial y, por tanto, del Estado. Al tratarse de un bien demanial, se le aplican plenamente los atributos de “inalienable e imprescriptible” que configuran ese régimen, por lo que no es susceptible de apropiación por particulares ni objeto de prescripción positiva.

Lo anterior significa que las aguas marítimas están fuera del comercio, y, por tanto, no pueden ser objeto de posesión, aunque se puede adquirir sobre ellas un derecho al aprovechamiento, más no un derecho a la propiedad (...)" (Zürcher Blen & Jiménez Madrigal, 2004). No obstante, su uso particular puede darse siempre y cuando se cuente con la debida autorización administrativa, misma que suele ser de dos tipos: el permiso o la concesión de uso. El permiso de uso implica normalmente una autorización a título precario que puede ser revocada por razones de oportunidad y conveniencia, sin responsabilidad de la Administración, según el artículo 154 de la Ley General de la Administración Pública, por lo que debe ser descartado como figura jurídica para la construcción de obras permanentes.

Por su lado, la concesión es el mecanismo viable para acceder a la realización de obras permanentes o de significativa envergadura sobre bienes de dominio público. En el caso del mar, el legislador ha querido darle una tutela reforzada, indicando que debe ser la Asamblea Legislativa la que otorgue la respectiva concesión. Específicamente la Ley sobre la Zona Marítimo Terrestre (No. 6043 de 2 de marzo de 1977), en su artículo 5 establece que, salvo disposición legal en contrario, solamente la Asamblea Legislativa podrá otorgar concesiones en las zonas cubiertas permanentemente por el mar, adyacentes a los litorales, lo que incluye a las denominadas "aguas interiores del Estado".

Licencia Ambiental

Antes de obtener una concesión, se debe obtener una licencia ambiental de la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA) con base en la Ley Orgánica del Ambiente (Ley N° 7554 del 4 de octubre de 1995). De acuerdo con esta ley, cualquier obra o infraestructura construida en ecosistemas marino-costeros debe realizarse de manera que no cause daños. Si existe la posibilidad de que se produzcan daños, se debe realizar una evaluación de impacto ambiental (art. 43). El Artículo 17 de esa misma Ley coloca un requisito de Evaluación de Impacto Ambiental también para actividades humanas que generen residuos, materiales tóxicos o peligrosos. Los recursos marinos y costeros incluyen diversos elementos, como las aguas marinas, las playas, las franjas costeras, las bahías, los manglares, los arrecifes de coral, etc., tal como se definen en el artículo 39.

Por lo indicado, en materia legal y de gobernanza, la línea de base muestra un conjunto robusto de legislaciones que promueven el desarrollo equilibrado con el medio ambiente, el acceso a la información y los mecanismos de participación. Las condiciones habilitantes legales incluyen la mejora del ordenamiento espacial marino y la actualización de normativas ambientales para que incluyan parámetros y lineamientos adecuados para la tecnología marina. Las medidas de gobernanza propuestas abarcan la reforma de reglamentos en áreas específicas como contaminación paisajística, ruidos, vibraciones, recursos pesqueros, impacto social y campos electromagnéticos. También se propone el desarrollo de normas técnicas basadas en el Sistema Nacional de la Calidad y la implementación de normas de interconexión con el Sistema Eléctrico Nacional.

Es importante que se pueda establecer una Unidad de Gobernanza Marina en el área del eventual aprovechamiento de energías marinas, y que cuente con la Ordenación del Espacio

Marino, ya que en estas áreas conviven el turismo, la pesca, la conservación y ahora la producción de energía, por lo que es necesario contar con esta herramienta de planificación y gestión. A continuación, en forma cronológica, las leyes que impulsan el uso de energía limpia.

Ley 449 de 1949, creación del Instituto Costarricense de Electricidad para desarrollar razonablemente las fuentes productivas de energía que posee la nación, especialmente los recursos hidráulicos.

Ley 5961 (dic., 1976). Declara de interés público la investigación, exploración y explotación de los recursos geotérmicos del país.

Ley 7200 (Sept., 1990), capítulos I y II. Ley que regula la compra de energía con generadores privados solo de fuentes renovables y hasta por 20 MW. Esta ley es para generación autónoma o paralela como la producida por centrales eléctricas de limitada capacidad, pertenecientes a empresas privadas y cooperativas de electrificación rural que puedan ser integradas al sistema eléctrico nacional.

Ley 7447 (nov., 1994). Ley de Regulación del Uso Racional de la Energía Renovable. Establece los mecanismos para alcanzar el uso eficiente de la energía renovable y sustituirlos cuando convenga al país, considerando la protección del ambiente.

Ley N° 7593 de la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ago., 1996), la ARESEP es responsable de "fijar precios y tarifas, así como velar por el cumplimiento de las normas de calidad, cantidad, confiabilidad, continuidad, oportunidad y suministro de energía eléctrica renovable.

Ley 8345 (Feb., 2003). Ley de Participación de las Cooperativas de Electrificación Rural y de las Empresas de Servicios Públicos Municipales en el Desarrollo Nacional.

Ley 8723 (abr., 2009). Ley marco de concesión para el aprovechamiento de las fuerzas hidráulicas para la generación hidroeléctrica.

Ley 10086 (dic., 2021). Ley para la promoción y regulación de recursos energéticos distribuidos a partir de fuentes renovables. El objetivo es establecer las condiciones necesarias para promover y regular, bajo un régimen especial de integración eficiente, segura y sostenible, las actividades relacionadas con el acceso, la instalación, la conexión, la interacción y el control de recursos energéticos distribuidos basados en fuentes de energía renovables.

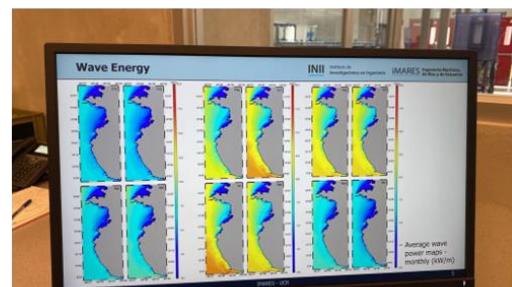
No tenemos una ley específica que faculte el aprovechamiento de energía marina, sin embargo, tenemos decretos sobre ordenamiento espacial marino, gobernanza marina y Política Nacional del Mar Costa Rica 2013-2028, que incluyen ordenanzas sobre el aprovechamiento de recursos energéticos en mares nacionales.

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con la energía del mar.

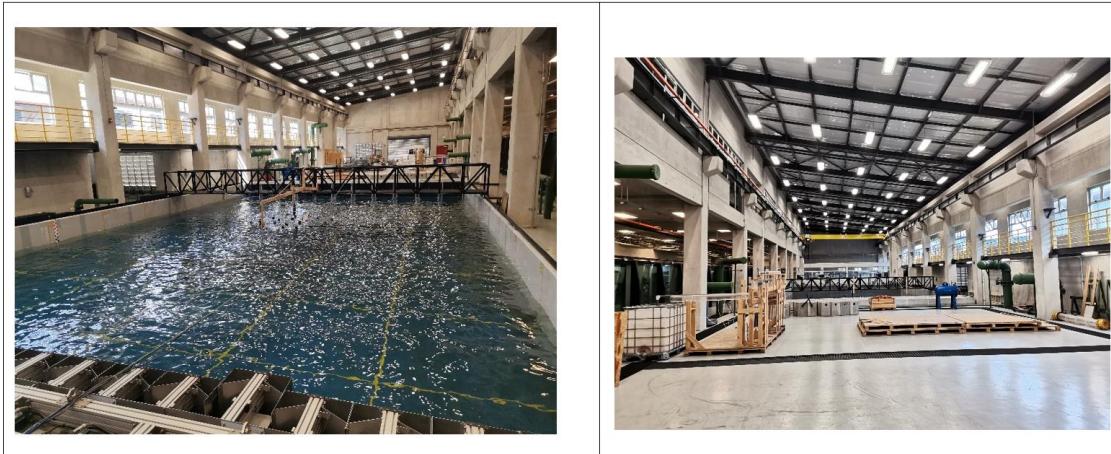
En Costa Rica la capacidad experimental está concentrada en la academia, en el siguiente cuadro se presentan las organizaciones que aportan experiencia para el futuro aprovechamiento de energía del mar.

Nombre	Capacidades relacionadas con energía marina	Comentarios
MIO-CIMAR	Aplicación sobre predicción de clima marino, oleajes, viento, batimetrías	Desarrollada por UCR 
IMARES-INII	Bases de datos sobre predicción de olas, mareas. Estudios sobre energía de olas	Desarrollada por UCR 
SNIT	Sistema cartográfico nacional, aporta datos sobre perfiles marino-costeros	Desarrollada por IGN 
CIMAT	Comisión Interinstitucional de Marinas y Atracaderos Turísticos	Desarrollado por ICT 
UNA-Universidad Nacional	Departamento de física, laboratorio de oceanografía costera	Departamento de Física 

Sobre energía marina IMARES del Instituto Investigaciones en Ingeniería (INII) es el que lleva el liderazgo en infraestructura para estudios aplicados en olas, mares, corrientes. El detalle a continuación.



La Unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y de Estuarios nace como el Laboratorio de Ingeniería Marítima y Fluvial, en el año 2005, ante una gran demanda y necesidad de investigación, docencia y acción social en las áreas de la ingeniería de marítima y fluvial. A partir del año 2014, toma su nombre actual: iMARES. Se compone de un grupo multidisciplinario de investigadores, entre los cuales hay ingenieros civiles, mecánicos y agrícolas. De esta forma, se logra un trabajo integral que permite generar datos veraces y confiables que son de utilidad para el quehacer de la ingeniería nacional.



A partir del año 2018 se da inicio la experimentación mediante modelos físicos, esto gracias a la inauguración del Laboratorio de Ingeniería Marítima y Fluvial de la Universidad de Costa Rica. Sus principales líneas de trabajo se centran en la medición de oleaje, la simulación numérica de las variables hidrodinámicas, modelado físico y la generación de energía a partir de las ondas de mar. Otras tareas que realiza la unidad son el establecimiento de zonas de inundación, peligro de erosión y transporte de sedimentos; además del diseño y análisis de obras de protección y abrigo costeras.

La Unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios (IMARES) es un centro compuesto por un grupo multidisciplinario de investigadores calificados. La Unidad está conformada por ingenieros agrícolas, civiles y topógrafos, así como estudiantes asistentes que juntos logran un trabajo integral que permite generar soluciones eficientes y de calidad, así como investigaciones confiables. IMARES está comprometido con el desarrollo sustentable del país, por lo que sus líneas de investigación buscan brindar herramientas para mejorar la calidad del diseño de obras costeras y, a su vez, realizar una buena gestión y manejo de los ecosistemas marinos y costeros.

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de energías renovables.

Con respecto a la integración de energías renovables, en Costa Rica existe el Plan de Expansión de la Generación Eléctrica, PEG 2022-2040, fue publicado en Julio 2023, ese es el instrumento utilizado en la planificación de los planes de integración y expansión de la generación eléctrica y proporciona las respuestas a los requerimientos definidos en las proyecciones de demanda eléctrica. El PEG define un plan de largo plazo, focalizado en las decisiones estratégicas de la expansión de la generación. El PEG fue formulado atendiendo los criterios que Costa Rica ha dispuesto para el desarrollo de su matriz eléctrica, a través de las políticas nacionales en materia energética.

Estos criterios se refieren a los siguientes elementos: favorecimiento de fuentes renovables, baja dependencia de combustibles fósiles, seguridad energética, limitada exposición a importaciones, diversificación de fuentes, sostenibilidad ambiental y servicio al menor costo.

El PEG valora nuevos elementos asociados a la política energética nacional, la evolución de las diferentes tecnologías de generación y costos asociados, costos de combustible, disponibilidad de nuevos estudios de proyectos en el país, evolución del Mercado Eléctrico Regional, cambios en la matriz de generación nacional, evolución de la demanda nacional, entre otros. En el presente plan de expansión se observa un balance adecuado de oferta y demanda en el país en el corto plazo, lo cual permite confirmar las primeras adiciones de capacidad al sistema para el año 2024. Los elementos fundamentales de este plan de expansión son:

- Respuesta del sistema a la rápida recuperación de la demanda en período postpandemia.
- Valoración de la capacidad disponible en plantas de generación privada con contratos vencidos.
- Escasa capacidad de generación firme en el Sistema Eléctrico Nacional para atender la variabilidad de generación de las plantas variables renovables.
- Atención de un Plan de Modernizaciones muy exigente de plantas de generación de gran capacidad que aportan energía firme y requerirán estar fuera de operación por períodos prolongados.

PLAN DE EXPANSIÓN DE LA TRANSMISIÓN 2021-2031

La actualización de este plan está compuesta por 78 obras de transmisión en total, en donde un 36% de las obras entraron en servicio, 13% corresponden a obras incorporadas. Del restante 5% corresponde a obras cuya fecha de entrada en servicio propuesta en el plan de expansión 2019-2029 presentaron adelanto de 6 meses o menos, 5% fueron retiradas y 36% de obras presentaron cambios en sus cronogramas de 6 meses o más. A partir de los estudios técnicos elaborados durante el periodo 2021 y 2031 para el presente Plan de Expansión, se determinó que los proyectos de transmisión que resultan prioritarios para asegurar la suficiente capacidad de transporte son los siguientes:

Desde la perspectiva de inversiones, para el quinquenio 2021 – 2025 se tiene una inversión total anual de \$78 millones, mientras que para el periodo 2026 – 2031 alcanzaría los \$144 millones. El Plan de Expansión de Transmisión 2021 – 2031 tiene un costo total acumulado de inversión de \$222 millones de dólares al 2031 de los cuales \$220 millones corresponden a inversiones por parte del ICE y por parte de entidades externas al ICE asciende a los \$2 millones. El valor presente neto de las inversiones del plan es de \$147 millones. En cuanto a los costos operativos asociados a las nuevas obras, para el periodo 2021 – 2031 se requiere de un acumulado de \$15 millones para operar el sistema de transmisión, cuyo valor presente es de \$9.95 millones. Como conclusión, el costo total acumulado requerido para satisfacer las necesidades de expansión y operación del sistema de transmisión en el periodo 2021 – 2031 alcanza los \$237 millones.

PLAN PARA LA DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

En Costa Rica existen varios agentes que comercializan la generación y distribución de energía, estas son las cooperativas de electrificación rural y las empresas municipales. La Ley No. 8345, que entró en vigor en 2003 autoriza a los consorcios cooperativos y las empresas de servicios públicos municipales para que generen, distribuyan y vendan energía a los usuarios establecidos en el área geográfica de cobertura definida por su concesión, además las autoriza a suscribir entre ellas y las otras empresas públicas y municipales convenios de cooperación, inversión y operación conjunta. Las regiones no concesionadas a ninguna empresa y generalmente más alejadas y dispersas le corresponden al Instituto Costarricense de Electricidad. Las tarifas de todos estos servicios son definidas por la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP) con base en el principio de servicio al costo.

La distribución y comercialización de energía eléctrica en Costa Rica es responsabilidad de ocho empresas de servicio público. Estas empresas son el ICE y su subsidiaria CNFL, dos empresas municipales, ESPH y JASEC, y las cooperativas de electrificación rural de Guanacaste, San Carlos, Los Santos y Alfaro Ruiz, COOPEGUANACASTE, COOPELESCA, COOPESANTOS Y COOPEALFARORUIZ respectivamente.

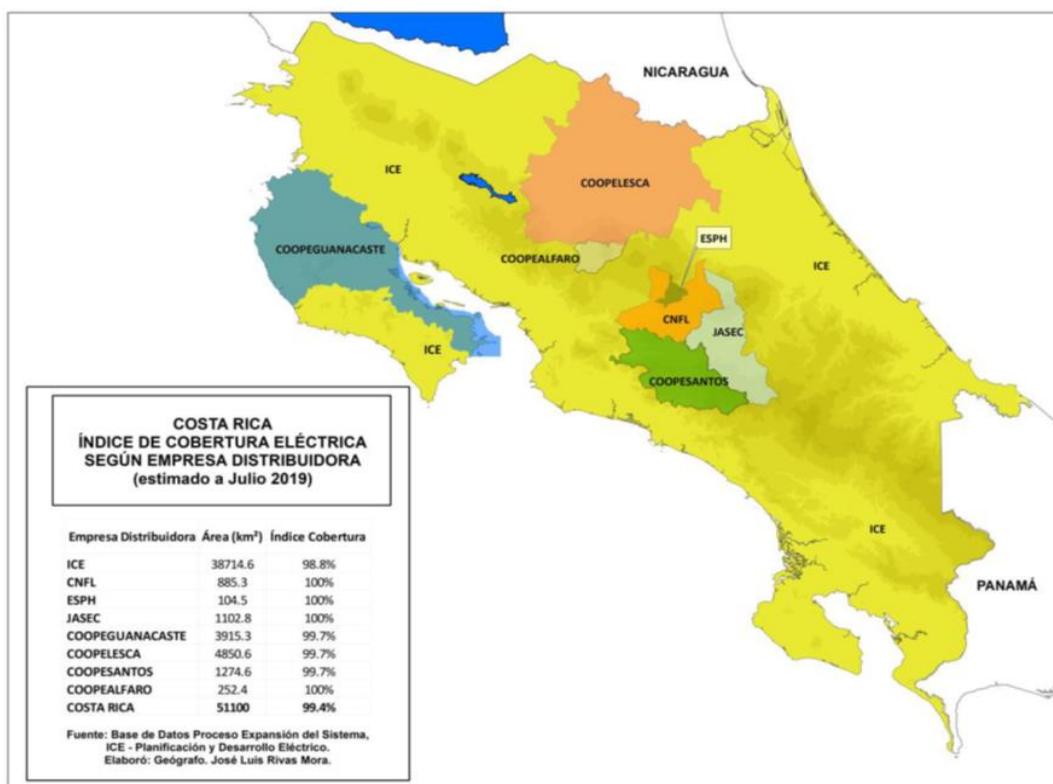
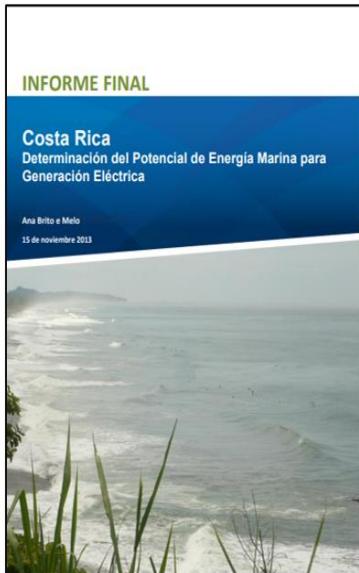


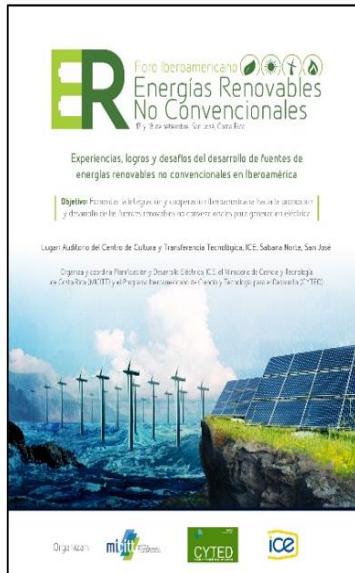
Figura 1. Áreas de concesión de servicio de las distribuidoras

4. Documentación relativa a energía del mar

A continuación, una muestra de documentos relacionados con energías del mar.



2013



2015



2020

Determinación de potenciales y promoción del desarrollo de energías marinas



2018



2021



2022

Estudios sobre el recurso eólico offshore



INFORME

Desarrollo de capacidad eólica marina en Costa Rica
Análisis técnico y recomendaciones de diseño para el sistema de boyas de monitoreo
Nro. de documento: O-KO-R10-031965-REP003
Cliente: CABEI



INFORME

Desarrollo de la capacidad eólica marina en Costa Rica
Diseño de un sistema de boyas de monitoreo: Análisis de mercado
Nro. de documento: O-KO-R10-031965-REP004
Cliente: Banco Centroamericano de Integración Económica (CABEI)



INFORME

Desarrollo de capacidad eólica marina en Costa Rica
Análisis económico y financiero del sistema de boyas de monitoreo
Nro. de documento: O-KO-R10-031965-REP005
Cliente: CABEI

Diseño de un sistema de monitoreo de datos, 2023



INFORME

Desarrollo de capacidad eólica marina en Costa Rica
Componente 2: Análisis de mercado para la infraestructura marino-costera
Nro. de documento: O-KO-R10-031965-REP009
Cliente: CABEI



INFORME

Desarrollo de la capacidad eólica marina en Costa Rica
Componente 2: recomendaciones técnicas de ingeniería y diseño para la infraestructura marina costera.
Nro. de documento: O-KO-R10-031965-REP010
Cliente: CABEI



INFORME

Desarrollo de capacidad eólica marina en Costa Rica
Componente 2: Análisis financiero y económico
Nro. de documento: O-KO-R10-031965-REP011
Cliente: CABEI

Evaluación de la infraestructura marino-costera para el futuro desarrollo de la industria eólica marina, 2023



Desarrollo de una estrategia de concientización social para crear el consenso de los actores locales para el aprovechamiento futuro de la energía eólica marina en Costa Rica
Entregable 1
Mes: 2024



Desarrollo de una estrategia de concientización social para crear el consenso de los actores locales para el aprovechamiento futuro de la energía eólica marina en Costa Rica
Entregable 1
Mes: 2024



Desarrollo de una estrategia de concientización social para crear el consenso de los actores locales para el aprovechamiento futuro de la energía eólica marina en Costa Rica
Entregable 1
Mes: 2024

Estrategia de concientización social y de consenso, entre los actores locales, sobre el futuro aprovechamiento de la energía eólica marina en Costa Rica. 2024

Prospectiva ambiental sobre los desafíos que se presentan, así como un análisis de percepciones sociales en torno a la iniciativa. 2024

Estrategia de comunicación y concienciación ambiental y social para incrementar el consenso entre los actores nacionales, regionales y locales. 2024

5. Conclusiones finales y recomendaciones

Costa Rica no cuenta con un plan para el futuro aprovechamiento de energía marina, la actual administración ha mostrado interés, pero no se concretan acciones para un plan nacional de energías oceánicas.

El desarrollo de energía marina en Costa Rica aún es incipiente y sigue su desarrollo desde la academia. No tiene un marco legal directamente relacionado con el recurso, pero sí leyes y reglamentos conexos vinculados con la administración del mar.

Se cuenta con una hoja de ruta para el recurso eólico marino, las demás fuentes de energía, como olas, mareas y corrientes, no tienen una planificación nacional.

Sobre capacidades, el país cuenta con infraestructura para el prototipado y modelado de proyectos relacionados con el aprovechamiento del recurso energético marino.

El país cuenta con especialistas en oceanografía y expertos en campos como estudios meta-oceánicos, marco legal y estudios ecológicos marinos.

Se recomienda aumentar la inversión en estudios de línea base para conocer mejor la capacidad teórica disponible y el futuro aprovechamiento del mix de energías marinas.

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN CUBA

Félix Vladimir Roldán(Universidad de Oriente)

La crisis energética en Cuba es un problema complejo con raíces en la historia reciente del país. Durante los inicios de la revolución, se instalaron centrales de generación de energía con tecnología soviética en un esfuerzo por energizar la nación. Estos esfuerzos dieron frutos durante más de 40 años, pero con el tiempo, la generación se volvió ineficiente a medida que el consumo energético aumentó. Además, el bloqueo económico impuso limitaciones a la industria de generación de energía, resultando en una falta de piezas de repuesto y una limitada accesibilidad a los mercados de combustibles fósiles. La caída de la Unión Soviética y el fin de su ayuda a las naciones socialistas, sumado a las limitaciones impuestas por el bloqueo, han contribuido en gran medida a la situación actual. En la actualidad, Cuba enfrenta una crisis energética significativa. Las centrales de generación de energía están operando a mínima capacidad debido a su obsolescencia y la falta de piezas de mantenimiento y recambio. Además, la calidad y disponibilidad de los combustibles fósiles son limitadas. Esta situación problemática tiene un impacto considerable en la vida cotidiana y la economía del país. La falta de energía confiable puede afectar todo, desde la infraestructura básica hasta los servicios esenciales, y puede limitar el desarrollo económico. La importancia de abordar esta crisis no puede ser subestimada. No solo es crucial para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos cubanos, sino también para garantizar el desarrollo sostenible del país.

Para dar solución a esta problemática el país se ha planteado una estrategia de cambio de la matriz energética con vista a lograr una penetración de energías renovables cercana al 24% para el año 2030, esta estrategia se basa fundamentalmente en el desarrollo de parques fotovoltaicos, de parques eólicos y de la utilización de la biomasa. La obtención de energía a partir de fuentes marinas no se contempla como una de las opciones principales pese a que Cuba fue pionero en la experimentación con OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) por sus siglas en inglés. Entendemos con la principal causa de esta decisión la falta de madurez de muchas de las tecnologías que se utilizan en el mundo para obtener energía a partir del mar. El alto costo que esto conlleva, así como que las condiciones geográficas de la isla no son las mejores para muchas de estas tecnológicas.



Figura 1. Instalación de Conversión de Energía Térmica Oceánica. Matanzas. Cuba 1930.

1 Políticas energéticas en energías marinas/renovables

La energía marina no se encuentra regulada en ninguna legislación en Cuba y su limitación sólo está dada por las complejidades técnicas de su implementación. En el caso de las energías renovables en su conjunto se tiene el Decreto Ley No. 345 “Del desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía” aprobado el 28 de noviembre de 2019. Que establece lo siguiente:

- Para el sector estatal, la inclusión de las inversiones en el plan de la economía.
- Los incentivos y los beneficios arancelarios y fiscales a la inversión extranjera y personas jurídicas estatales.
- La producción de energía por productores independientes, incluyendo el sector residencial y la venta al Sistema Eléctrico Nacional.
- La planificación por parte de personas jurídicas y estatales mediante “Programa para el desarrollo, mantenimiento y sostenibilidad” con alcance de 5 años.
- La elaboración, por los ministerios de Educación Superior de Ciencia, Tecnología Medio Ambiente, en coordinación con el de Energía Minas, del “Programa para el desarrollo de la investigación científica y la innovación tecnológica.”
- La elaboración, por el Ministerio de Industrias, del “Programa para el desarrollo y producción de piezas de repuesto, equipos y medios relacionados con FRE y EE”.

Cuba finalizó 2020 con una potencia instalada de 297.4 megawatts (MW) provenientes de las fuentes renovables de energía (FRE), y trabaja para ampliar esta potencia, de acuerdo con una política nacional que se propone diversificar la matriz energética. El programa prevé que para el año 2030 el 24 % de la electricidad producida en el país provenga de las FRE. En la actualidad el 95 % de la matriz energética de Cuba se basa en combustibles fósiles, y solo el cinco por ciento en energías renovables. La política nacional para el desarrollo de las energías renovables, determina que la radiación solar, la energía eólica y la biomasa (bagazo de la industria azucarera, marabú y otras fuentes) son las áreas con mayores perspectivas en ese sentido. En menor medida, también pueden apoyar en la producción de energías las pequeñas hidroeléctrica y la instalación de biodigestores, fundamentalmente en el sector porcino. Programas de inversiones en curso o proyectadas se proponen explotar el potencial de 2 000 megawatts (MW) en energía solar fotovoltaica, 700 MW en parques eólicos y 600 MW en bioeléctricas asociadas a centrales azucareros. En esta planificación no se tienen en cuenta las energías renovables marinas, solamente se mencionan y existen estudios en curso para potenciar las mismas.

En Cuba se han realizado varios estudios sobre las potencialidades de las energías del mar encabezados por el instituto de meteorología que presenta el artículo “Potencial energético de las corrientes marinas en aguas cubanas”. Publicado en la revista de meteorología en el año 2020 (Revista Cubana de Meteorología, Vol. 26, No. 3, Julio-Septiembre 2020). Este artículo, como su nombre lo indica, se enfoca en un análisis del comportamiento espacio-temporal de las corrientes marinas en aguas aledañas a Cuba, con inclusión de los cálculos de su potencial

energético. El área de estudio es el territorio comprendido entre los 18 y 25° N y los 72 y 88° W. Como fuentes de datos se utilizaron la batimetría del Atlas GEBCO, las tablas anuales de mareas (1975-2016), los datos de estructura termohalina (1966-2000), la afectación por eventos severos de los archivos INSMET y NHC, así como la combinación de los modelos HYCOM para la simulación numérica de la circulación oceánica. Se calculó el potencial energético en aguas profundas, en canales de entrada de bahías y entre algunos cayos. En aguas someras, la bahía de Nipe es la que muestra el mayor potencial de los casos analizados. En aguas profundas, la velocidad de las corrientes oceánicas se mantiene con valores bajos durante todo el año y solamente en áreas de la corriente de lazo, a varias decenas de kilómetros de la costa noroccidental cubana, se observan velocidades mayores de 1 m/s. En aguas abiertas, el potencial energético aprovechable, en algunos meses puede ser del orden de hasta 2 kWatt/m², mientras que en zona costera solo la Bahía de Nipe muestra un potencial considerable, del orden de 0.0076-0.49 kWatt/m² durante el año [1].

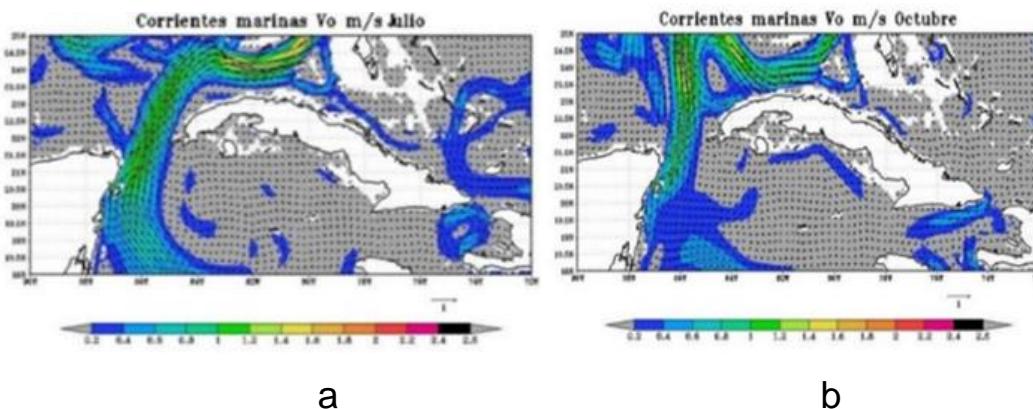


Figura 2. Distribución de las corrientes marinas en (a) Julio y (b) Octubre, con inclusión del Paso de los Vientos [1]

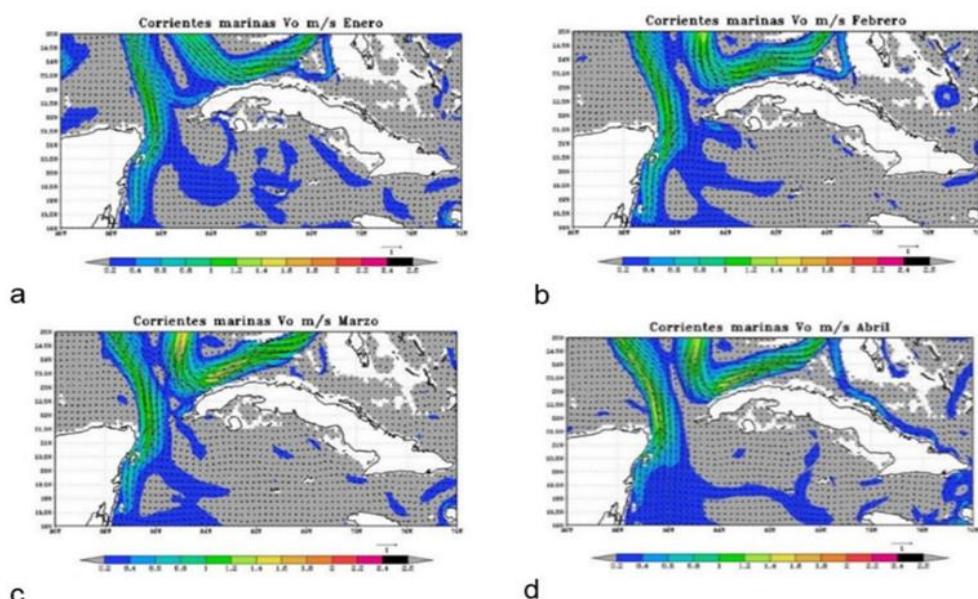


Figura 3. Velocidad promedio mensual de las corrientes marinas entre enero y abril.

El estudio plantea como conclusiones las siguientes:

- En las aguas aledañas a Cuba, las corrientes marinas presentan velocidades menores de 1 m/s y solamente en el área de la corriente de lazo, al norte de las provincias de Pinar del Río y Artemisa, ocasionalmente se observan algunos valores entre 1,2 y 1,6 m/s a más de 40 km de la costa cubana en la rama del canal de Yucatán y de más de 200 km en la rama del canal de La Florida. En la corriente de Yucatán, frente al Cabo San Antonio, en algunos meses es posible encontrar velocidades del orden de 1 m/s entre 30 y 50 km de distancia. Los valores mayores, de hasta 1,6 m/s, generalmente se localizan a más de 200 km de la costa cubana.
- El potencial energético aprovechable, en algunos meses puede ser del orden de hasta 2 kW para una sección transversal de 1 m², de modo que para lograr al menos un MW de potencia, sería necesario instalar una turbina de diámetro mayor de 168 m, a una distancia de varias decenas de kilómetros de las costas de Cuba.

En la tesis de grado: *Estudio de Viabilidad de Prototipos de Generación de Energía en la Costa Oriental de Cuba*. de Wilian Batista Silva se realiza un análisis del potencial de la OTEC en la Costa Oriental de Cuba, utilizando datos de temperatura del agua recopilados a través de la herramienta en línea data.marine.copernicus.eu.

Los datos recopilados para este estudio se dividen en dos categorías: la temperatura del agua en la superficie y la temperatura del agua en el fondo marino. Estos datos se han recopilado para cuatro regiones específicas: Granma, Santiago de Cuba, Guantánamo y Holguín. Para cada región, se han registrado las temperaturas máximas, mínimas y promedio tanto en la superficie como en el fondo marino. Los datos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1: Máximos, mínimos y promedios de temperatura del mar superficiales y submarinos en las regiones estudiadas.

Región	Temperatura en la superficie (°C)			Temperatura en el fondo marino (°C)		
	Máxima	Promedio	Mínima	Máxima	Promedio	Mínima
Granma	31.61	29.06	25.76	16.69	15.40	13.59
Santiago de Cuba	31.35	29.01	26.79	3.01	2.97	2.95
Guantánamo	30.95	28.58	26.41	6.22	5.54	5.12
Holguín	30.68	28.11	25.49	8.58	7.47	6.66

Una vez recopilados los datos de temperatura en la superficie y en el fondo marino, se ha realizado un análisis adicional para calcular las diferencias de temperatura entre estos dos puntos. Estas diferencias son cruciales para la Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC), ya que la eficiencia de la OTEC depende en gran medida de la magnitud de esta diferencia de temperatura.

Los resultados de este análisis se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2: Diferencias de temperatura entre la superficie y el fondo marino en la región estudiada.

Región	Diferencias (°C)		
	Máxima	Promedio	Mínima
Granma	14.92	13.66	12.17
Santiago de Cuba	28.34	26.04	23.84
Guantánamo	24.73	23.04	21.29
Holguín	22.10	20.64	18.83

Los datos recopilados indican que las temperaturas en la superficie varían entre 30.68 °C y 31.61 °C, mientras que las temperaturas en el fondo marino oscilan entre 2.95 °C y 16.69 °C. Además, se calcularon las diferencias de temperatura entre la superficie y el fondo marino, un factor crucial para la eficiencia de la OTEC, y los resultados muestran que estas diferencias varían entre 12.17 °C y 28.34 °C.

A partir de estos datos, se puede inferir que la Costa Oriental de Cuba presenta condiciones propicias para la implementación de la tecnología de Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC). Las diferencias de temperatura entre las aguas superficiales y las profundas del océano, especialmente en las regiones de Santiago de Cuba y Guantánamo, son lo suficientemente significativas como para permitir la generación eficiente de electricidad utilizando la tecnología OTEC.

No obstante, una limitación fundamental para la aplicación de este método es el estado actual de la tecnología OTEC. A pesar de los avances significativos realizados en las últimas décadas, la tecnología OTEC aún se encuentra en las primeras etapas de desarrollo y presenta desafíos técnicos y económicos considerables. Por lo tanto, aunque los datos sugieren que la OTEC podría ser viable en la Costa Oriental de Cuba, se requeriría un análisis más detallado para llegar a una determinación definitiva. Este análisis debería tener en cuenta una variedad de factores, incluyendo los costos económicos, los impactos ambientales y el estado actual de la tecnología OTEC [2].

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con la energía del mar.

No existe un entramado industrial dedicado exclusivamente al desarrollo de las energías marinas. Sin embargo, existen capacidades de producción instaladas en diferentes industrias del territorio como las de las empresas agroindustriales, militares e hidráulicas que se pueden utilizar para contribuir al desarrollo de las plantas de generación.

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de energías renovables.

Estos documentos de existir no son de dominio público. Si es conocido que la situación actual de la red eléctrica es precaria tanto en la distribución como en la transmisión. Específicamente podemos exponer los siguientes datos:

Según la oficina nacional de estadística (ONEI) en Cuba existen 4 068 528 consumidores. El país tiene más del 99 % de electrificación, 0,1% Aislado, 24 subestaciones de 220 kV, 3 086 km líneas 220 kV, 4 648 km líneas 110 kV, 144 subestaciones de 110 kV, 11 422 km líneas 34.5 kV, 42 418 km líneas primarias.

La máxima demanda del país varía según la estación y supera los 3318 MW.

Además de la generación base, que está fundamentada en fuentes térmicas el país cuenta con 509 GE Fuel Oil en 39 centrales con 1275 MW, 954 GE Diesel en 150 centrales con 1293 MW, 10798 GE de Emergencia en Centros Vitales de la economía con 1075 MW. Incluimos en el directorio documentos de la ONEI que soportan esta información.

4. Documentación relativa a energía del mar en Cuba

Tabla 3. Documentos recopilados.

Nº	Nombre	Contenido
	Potencial energético de las corrientes marinas en aguas cubanas	Potencial energético de las corrientes marinas en aguas cubanas
2	“Política para el desarrollo perspectivo de las fuentes Renovables y el uso eficiente de la energía”	Resumen de la política de transición energética en Cuba para el año 2030
3	Presentación Energías Renovables Marinas_INSMET	Resumen de los trabajos realizados por el INSMET en Cuba relacionados con las energías marinas
4	Estudio de Viabilidad de Prototipos de Generación de Energía en la Costa Oriental de Cuba.	Estudio de Viabilidad de Prototipos de Generación de Energía en la Costa Oriental de Cuba.

5. Conclusiones finales y recomendaciones

En las aguas aledañas a Cuba, las corrientes marinas presentan velocidades menores de 1 m/s y solamente en el área de la corriente de lazo, al norte de las provincias de Pinar del Río y Artemisa, ocasionalmente se observan algunos valores entre 1,2 y 1,6 m/s a más de 40 km de la costa cubana en la rama del canal de Yucatán y de más de 200 km en la rama del canal de La Florida. En la corriente de Yucatán, frente al Cabo San Antonio, en algunos meses es posible encontrar velocidades del orden de 1 m/s entre 30 y 50 km de distancia. Los valores mayores, de hasta 1,6 m/s, generalmente se localizan a más de 200 km de la costa cubana.

El potencial energético aprovechable, en algunos meses puede ser del orden de hasta 2 kW para una sección transversal de 1 m², de modo que para lograr al menos un MW de potencia, sería necesario instalar una turbina de diámetro mayor de 168 m, a una distancia de varias decenas de kilómetros de las costas de Cuba.

La Costa Oriental de Cuba presenta condiciones propicias para la implementación de la tecnología de Conversión de Energía Térmica Oceánica (CETO). Las diferencias de temperatura entre las aguas superficiales y las profundas del océano, especialmente en las regiones de Santiago de Cuba y Guantánamo, son lo suficientemente significativas como para permitir la generación eficiente de electricidad utilizando la tecnología OTEC.

No obstante, una limitación fundamental para la aplicación de este método es el estado actual de la tecnología OTEC. A pesar de los avances significativos realizados en las últimas décadas, la tecnología OTEC aún se encuentra en las primeras etapas de desarrollo y presenta desafíos técnicos y económicos considerables. Por lo tanto, aunque los datos sugieren que la OTEC podría ser viable en la Costa Oriental de Cuba, se requeriría un análisis más detallado para llegar a una determinación definitiva. Este análisis debería tener en cuenta una variedad de factores, incluyendo los costos económicos, los impactos ambientales y el estado actual de la tecnología OTEC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Grupo de documentos que sirven como base de consulta sobre las potencialidades de las energías del mar en Cuba.

- “El estudio del Potencial energético de las corrientes marinas en aguas cubanas”. Publicado en la revista de meteorología en el año 2020 (Revista Cubana de Meteorología, Vol. 26, No. 3, Julio-Septiembre 2020).
- Estudio de Viabilidad de Prototipos de Generación de Energía en la Costa Oriental de Cuba. de Wilian Batista Silva
- Martin G. Brown, Michel GAUTHIER, Jean-Marc Meurville. George Claude's Cuban OTEC experiment... <https://argonautes.club/george-claude-s-cuban-otec-experiment.html>
- Achkienasi-Amezcu, A., & Mitrani-Arenal, I. (2012). El océano como fuente de energía renovable, sus aplicaciones en Cuba. INSTECC.
- Hernández Secades, J., & Mitrani Arenal, I. (2016). Evaluación de la energía maremotérmica en la costa norte de las Provincias Holguín y Guantánamo. INSTECC.
- Hernández, J., Mitrani, I., Amezcu, A., & Cabrales, J. (2017). Evaluación de la energía maremotérmica en la costa norte de las provincias Holguín y Guantánamo. Evaluation of the Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) on the northern coast of the provinces Holguin and Guantanomo.
- Yull, A. (2017). Evaluación de las potencialidades energéticas del recurso olas, en la costa norte de las provincias de Holguín y Guantánamo. INSTECC.
- Hernández, J., Mitrani, I., Cabrales, J., Hidalgo Mayo, A., Yull, A., Avalos, Y., Calzada, A., Carracedo Hidalgo, D., & Rodriguez, A. (2019). Caracterización de las potencialidades energéticas de los mares circundantes a Cuba. Characterization of the energy potentialities of the seas surrounding Cuba.
- Mitrani-Arenal, I., & Cabrales-Infante, J. (2020). Potencial energético de las corrientes marinas en aguas cubanas. Revista Cubana de Meteorología, 26(3).
- Abreu, M., Rodriguez, A., & Hernández, J. (2021). Selección de sitios para la obtención de energía maremotérmica terrestre utilizando tecnología satelital. INSTECC.
- Loaces, I., Hernández, J., & Casals, R. (2021). Análisis del potencial undimotriz en la región oriental de Cuba a partir del uso de un modelo espectral de oleaje. INSTECC.

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN ECUADOR

Jesús Portilla Yandún (Escuela Politécnica Nacional)
Emérita Alexandra Delgado Plaza (Escuela Politécnica del Litoral –ESPOL)
Rubén José Paredes Alvarado (Escuela Politécnica del Litoral –ESPOL)
Juan Manuel Peralta Jaramillo (Escuela Politécnica del Litoral –ESPOL)
Danny Vinicio Ochoa Correa (Universidad de Cuenca)

1. Políticas energéticas en energías del mar

En Ecuador, la implementación de energías renovables es un tema emergente, por ende, no existen leyes específicas que regulen exclusivamente las energías renovables marinas. La razón de ello puede ser que el país goza de ingentes recursos hidroeléctricos cuyo mayor potencial aún no ha sido explotado aún. Por otro lado, el Ecuador es un país productor de petróleo, y esta disponibilidad, en general favorable, desestimula el uso de fuentes alternativas de energía. Sin embargo, recientes sequías han demostrado la vulnerabilidad de esta infraestructura al cambio climático que podrían generar interés estatal en la diversificación de la matriz energética.

Existen regulaciones que afectan a las energías renovables en general, las cuales podrían impactar indirectamente a cualquier iniciativa en marco de las energías renovables marinas:

- **Ley Orgánica de Servicio Público de Energía Eléctrica (2015):** Esta ley regula la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica en Ecuador, además, presenta acciones de fomento para la inversión en proyectos de energías renovables, incluyendo la construcción de un marco normativo para el sector energético.
<https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC154768/>
- **Ley de Eficiencia Energética (2019):** Promueve el uso eficiente de la energía y la implementación de energías renovables para reducir las emisiones GEI, además de impulsar la sostenibilidad energética.
<https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu196087.pdf>
- **Ley Orgánica de Competitividad Energética (2024)** promulgada en enero de 2024, tiene como objetivo principal promover el desarrollo de energías renovables en el país, Los incentivos de inversión se pueden aplicar a las energías renovables marinas.
https://www.sri.gob.ec/o/sri-portlet-biblioteca-alfresco-internet/descargar/dc355762-1161-4144-92c1-4d0b2ada359e/Ley_Competitividad_Energ%C3%A9tica_11012024.pdf
- **Plan Maestro de Electrificación 2018-2027:** Este plan incluye estrategias y objetivos para incrementar la participación de energías renovables en la matriz energética del país.
<https://www.cnelep.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/Plan-Maestro-de-Electricidad-2018-2027.pdf>

Por otro lado, dos regulaciones, ARCERNR-001/2021 y ARCERNR-002/2021, permiten la generación distribuida de energía renovable. Estas regulaciones establecen los requisitos para instalar y operar sistemas de generación distribuida de hasta 1 MW para autoconsumo y hasta 10 MW para empresas. En esta misma regulación se define:

” Energía Renovable no Convencional (ERNC): Energía proveniente de recursos capaces de renovarse ilimitadamente como: sol (fotovoltaica, solar termoeléctrica), viento (eólicas), agua, (pequeñas centrales hidroeléctricas), interior de la tierra (geotérmicas), biomasa, biogás, olas, mareas, rocas calientes y secas.”

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con las energías del mar

En el 2013, fue presentado el estudio de la energía de olas, corrientes y energía cinética de ríos en el Ecuador para la generación eléctrica por parte del Instituto Nacional de Preinversión, en base a la información recopilada por el Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada (INOCAR), con la finalidad de evaluar el potencial de generación. En dicho estudio se analizó el perfil costanero incluyendo las islas Galápagos, como también los ríos de la Costa.

Las condiciones de las olas en sitios específicos de aguas profundas (más de 2000 m), frente a las costas de las Galápagos, sur Esmeraldas y Guayas, muestran que las alturas se mantienen constantes, lo cual supone condiciones favorables para el aprovechamiento de las olas. Sin embargo, es necesario evaluar con mayor detalle el comportamiento de las olas a profundidades menores de 150 m. En la Figura 1 se aprecia el contenido energético del oleaje en el territorio ecuatoriano, el cual en promedio tiene un valor de 14 kW/m [1].

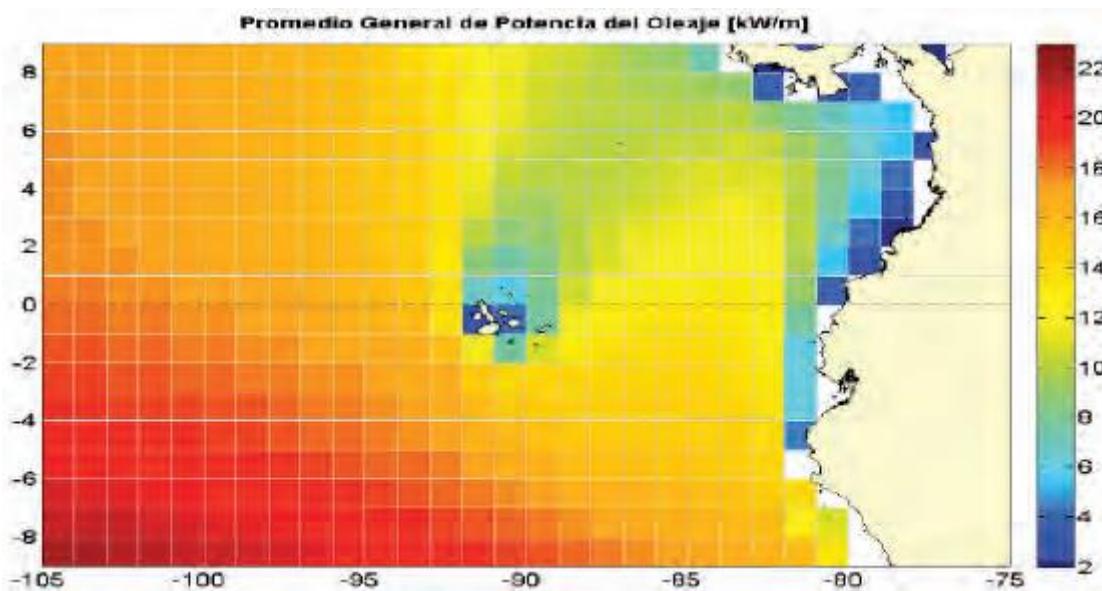


Figura 1. Mapa de promedio general de potencial de oleaje en la zona del océano Pacífico ecuatorial [1]

La variación energética de las olas es relativamente baja como se aprecia en la Figura 2, lo cual es importante ya que asegura una producción de energía relativamente estable a lo largo del año.

Además, se analizaron las corrientes marinas en las zonas costeras por medio de datos obtenidos del proyecto OSCAR (Ocean Surface Current Analyses Real Time) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) en los cuales las corrientes marinas tienen velocidades por debajo de los 1 m/s tal como se muestra en la Figura 3. Estos datos fueron posteriormente contrastados con los del INOCAR en donde la velocidad de las corrientes marinas no sobrepasa los 0.8 m/s mostrando coherencia entre los resultados obtenidos.

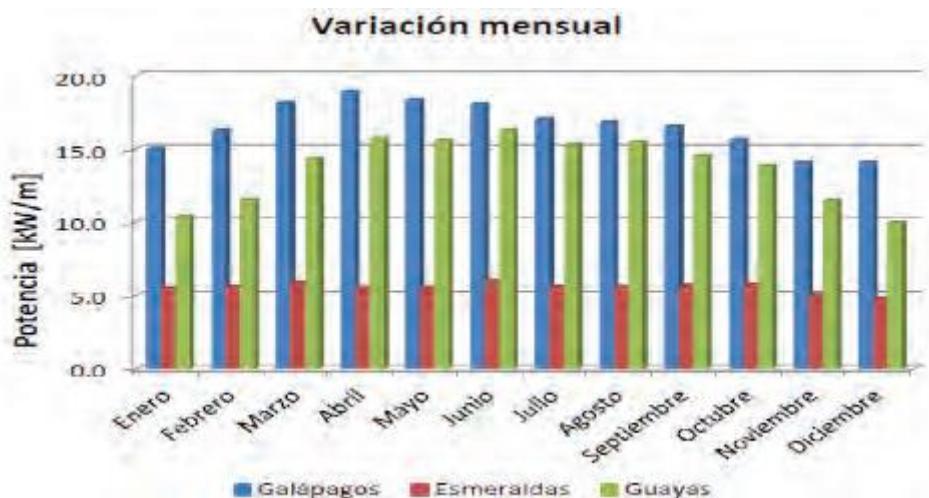


Figura 2. Variaciones mensuales de potencia correspondiente a Galápagos, Esmeraldas y Guayas [1]

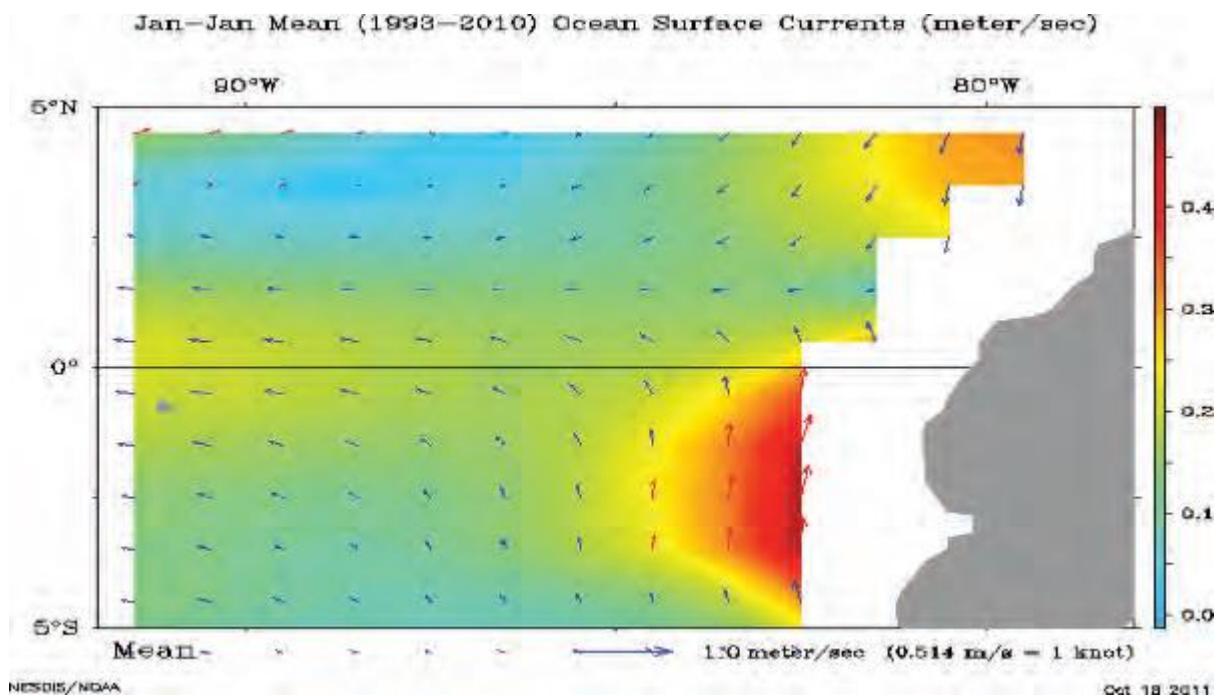


Figura 3. Velocidades promedio en enero (1993-2010) [1]

Mayores velocidades se alcanzan dentro de canales, entre islas y estuarios, por ejemplo, en el Estero Salado, canales entre Posorja y Puná y el Canal entre Puná y la Puntilla de Jambelí se tienen los registros máximos entre 3 y 4 m/s como se observa en la Figura 4. También en la zona del puerto de Esmeraldas se han encontrado velocidades mayores a los 2 m/s.

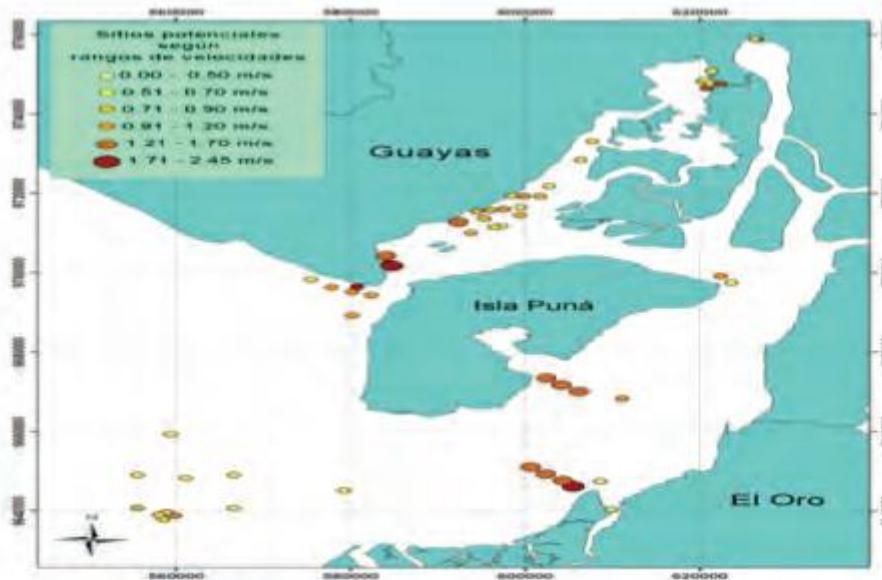
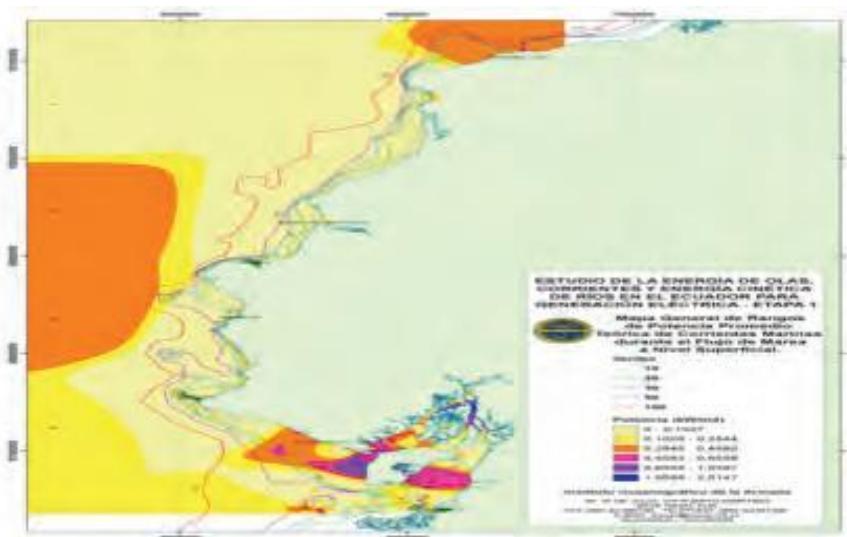


Figura 4. Velocidades promedio en enero (1993-2010) [1]

La máxima densidad de potencia teórica es de 2.98 kW/m², correspondiente a una velocidad promedio de 1.89 m/s en sectores de la provincia del Guayas. Los cálculos se realizaron asumiendo un radio de paleta de generador de 5 metros, así como el valor de densidad del agua de mar igual a 1027 Kg/m³ y se utilizó la velocidad promedio de todo el registro de datos de cada sector, diferenciando para flujo (Figura 5) y reflujo (Figura 6).



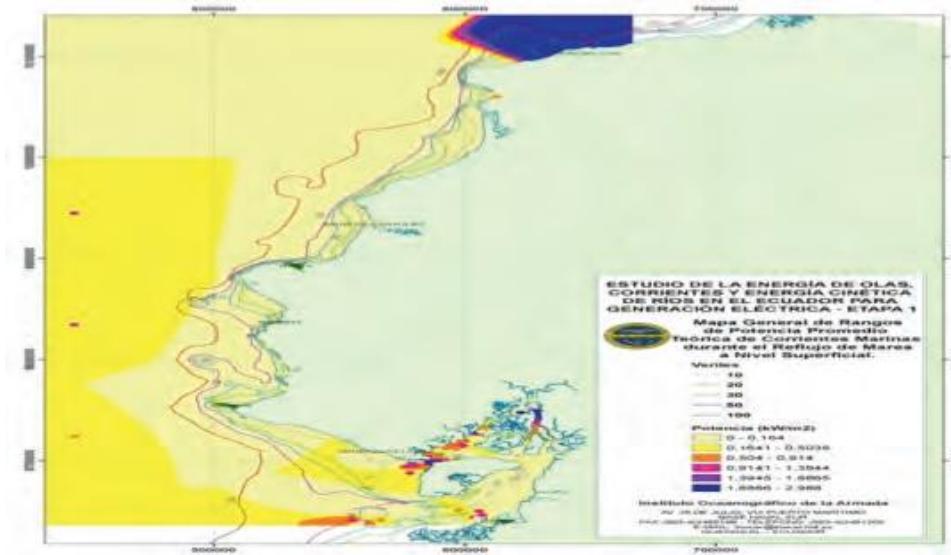


Figura 6. Densidad de potencia (kW/m²) a nivel superficial calculada durante el reflujo [1]

Dentro de los estudios realizados no se ha evaluado en el Ecuador el potencial de generación debido a gradientes de temperatura ni a gradientes de salinidad.

Líneas de investigación y desarrollo

Desde el año 2010 se han realizado estudios exploratorios y de pre-factibilidad concernientes a diversas fuentes de energía renovable, sin embargo, la mayoría de ellos no han sido difundidos ampliamente y por lo tanto son de difícil acceso. La principal excepción es el de la energía undimotriz de la cual se han realizado varias investigaciones tanto de estimación del recurso como de otros aspectos técnicos concernientes a la conversión de dicha energía en energía eléctrica, y su potencial impacto en el suministro a la red de consumo [2, 3]. Entre estos estudios se pueden citar los siguientes:

Evaluación del recurso energético

2013: Wave energy resources: Wave climate and exploitation (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.032>)

2023: Wave Spectral Analysis for designing Wave Energy Converters (DOI: <https://doi.org/10.36688/ewtec-2023-175>)

2024: Spectral and Entropy based wave energy resource assessment: a global view and point analysis at the Galapagos Islands (actualmente en revisión en Journal of Renewable Energy).

Estos estudios son de carácter global con un enfoque comparativo para el Ecuador y hacen énfasis en el hecho de que existe una gran disparidad entre el recurso energético existente en las olas, y el “recurso aprovechable”. La principal conclusión es que el parámetro más usado para mapear este recurso, que es la ‘potencia del oleaje’ (kW/m) promediado en un extenso periodo de tiempo, es un parámetro engañoso que introduce un severo sesgo. Según

este parámetro las zonas extra-tropicales de tormenta gozan de un mayor recurso mientras que la zona ecuatorial sujeta a condiciones de viento moderadas dispone de un bajo recurso. Sin embargo, análisis de mayor profundidad indica que la realidad es exactamente la contraria. Esta paradoja se explica principalmente por tres factores, 1) la variabilidad estacional, 2) la presencia de valores extremos, y 3) la calidad del oleaje cuantificada por la dispersión espectral, ver Figura 7.

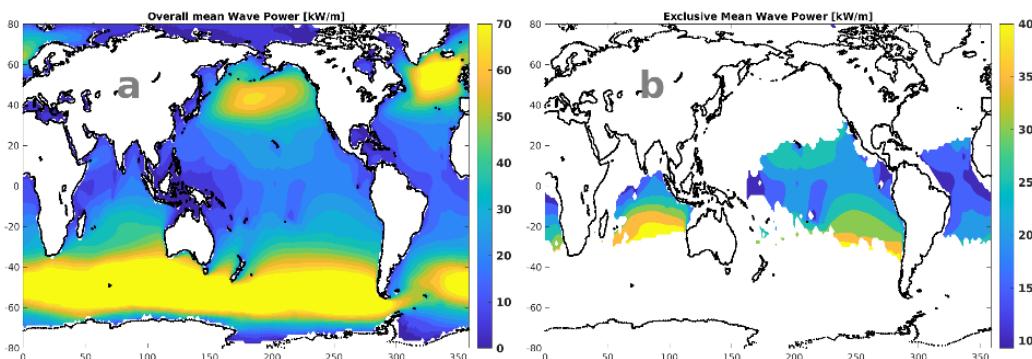


Figura 7. a) Promedio de la potencia global de oleaje (40 años), b) igual que a) pero mostrando las zonas con potencial aprovechable, con estabilidad estacional, extremos limitados, y condiciones de oleaje quasi-sinusoidales.

Estudios técnicos hidrodinámicos

2023: Tuning Wave Energy Converters to local wave conditions (DOI:
<https://doi.org/10.36688/ewtec-2023-paper-176>)

2024: Feasibility study of a method for tuning wave energy converters (DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103702>)

Estudios de integración a la red de distribución

2024: The potential of Wave Energy Converters in the Galapagos islands (DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101457>)

Dado el enorme potencial undimotriz del que goza el Ecuador, en este estudio se explora su factibilidad para el uso en zonas remotas, como algunas zonas de la costa ecuatoriana y las islas Galápagos. Con respecto a estas últimas, se hace énfasis en el hecho de que su uso no puede poner en riesgo la vida marina, de gran valor para la humanidad, que existe en las islas.

También se ha ejecutado el diseño de prototipos considerando en algunos casos, los costos de fabricación tal como se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Prototipos desarrollados

<i>Tipo de Tecnología</i>	<i>Capacidad</i>	<i>Costo de fabricación</i>	<i>Año</i>	<i>Referencia</i>
OWC	2.84 W	\$ 89.99	2020	[4]
OB – Boya conectada a sistema biela-manivela	-	\$ 111.90	2020	[5]
OWC	8.6 W	577.93	2020	[6]
OB - Paleta de Salter	-	-	2019	[7]

De los estudios ejecutados, son pocos los que han incluido el análisis económico de la implementación de sistemas undimotrices. En la Tabla 2 se detallan las características de estos estudios.

Tabla 2. Características de estudios de implementación de energía undimotriz en Ecuador

<i>Ubicación</i>	<i>Capacidad</i>	<i>Tipo de Tecnología</i>	<i>Costo de implementación</i>	<i>Año</i>	<i>Referencia</i>
Comuna San Pedro, Prov. De Santa Elena	750 kW	OB - Power Buoy	\$2108340	2019	[8]

A pesar de la vasta cantidad de conceptos y dispositivos propuestos que pueden encontrarse en la literatura, un problema que se suele dejar de lado es el así llamado ‘problema hidrodinámico’. Que consiste en la disparidad existente entre la frecuencia natural de un dispositivo flotante en contacto con olas, y la frecuencia misma de las olas, siendo esta última mucho más baja que la de los potenciales dispositivos WEC. Sincronizar estas dos frecuencias es esencial para operar de forma resonante en la zona del espectro de oleaje que contiene la mayor cantidad de energía. Los estudios referidos anteriormente proponen un método de sincronización pasivo basado en principios de ingeniería naval.

En cuanto a otras tecnologías de energías del mar, pese a que no existen investigaciones en el país respecto a gradientes de temperatura, estos sistemas no representan una oportunidad para el cambio de matriz energética de Ecuador ya que los valores de gradiente de temperatura en la costa ecuatoriana se ubican entre 15 a 17.5 °C, que están por debajo de los 20 °C requeridos para su aprovechamiento. Este comportamiento puede deberse a que la corriente fría de Humboldt incide en la reducción los gradientes de temperatura en las costas ecuatorianas. Por el contrario, los gradientes de salinidad poseen un gran potencial de aprovechamiento. Sin embargo, no se poseen estudios realizados en el Ecuador y su aplicación no está considerada dentro de la planificación energética realizada por los entes gubernamentales competentes.

Actualmente no se han realizado avances con respecto a la ejecución de proyectos de energía del mar en alguna de las opciones de aprovechamiento [9]. Además, dentro del Plan Maestro de Electrificación 2016-2025 no se ha considerado la aplicación de energía del mar en el programa de cambio de matriz energética [10] pese a que este documento manifiesta el interés del Estado en acrecentar la soberanía energética y cumplir con los objetivos de desarrollo sostenibles número 7, 9, 12 y 13 propuestos por la ONU.

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de energías renovables.

En Ecuador, el operador del sistema de transmisión es el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). Este organismo es responsable de coordinar la operación del sistema eléctrico nacional y asegurar la estabilidad y confiabilidad del suministro de energía.

La Ley Orgánica de Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE) regula la integración de energías renovables y establece requisitos técnicos específicos para la conexión y operación de estas instalaciones. Las actualizaciones recientes se centran en asegurar la estabilidad del sistema y facilitar la inversión privada. En el documento se incluye los requisitos de capacidad de permanencia durante huecos de tensión, control de potencia activa y reactiva, y estabilidad frente a desviaciones de frecuencia y tensión.

<https://www.recursoseynergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/07/Reglamento-LOSPEE.pdf>

El Plan Maestro de Electrificación establece los siguientes requisitos técnicos:

- Frecuencia nominal de 60 Hz con un rango permitido de 59.5 a 60.5 Hz.
- Desconexión automática si la frecuencia cae por debajo de 59.5 Hz durante más de 3 segundos.
- Las plantas deben ser capaces de reducir la potencia activa según las indicaciones del CENACE.
- Deben informar la diferencia entre la potencia actual y la potencia máxima posible.
- Capacidad de Permanencia durante Fallos
- Las plantas deben permanecer conectadas durante caídas de tensión hasta cero volts por al menos 150 ms.
- Deben soportar caídas de tensión de corta duración y estabilizar rápidamente la potencia activa y reactiva tras la recuperación de la tensión.
- Las instalaciones deben limitar la corriente activa y reactiva durante fallos según las especificaciones técnicas, priorizando la estabilidad del sistema.

El documento principal sería el Plan Maestro de Electrificación que abarca aspectos de generación, transmisión y distribución de energía. Algunos puntos clave son:

- Capacidad de Generación: Se identifican las capacidades instaladas y en operación de diversas fuentes de energía, incluyendo opciones de generación basada en energía renovables
- Infraestructura de Transmisión y Distribución: Se describe el estado de las líneas de transmisión y redes de distribución, incluyendo su antigüedad, capacidad y necesidad de modernización.

Por otra parte, PME detalla las metas y proyectos específicos para la expansión de la capacidad de generación, así como la ampliación y modernización de la infraestructura de transmisión y distribución:

- Metas de Expansión: Incrementar la capacidad instalada de generación con un enfoque en energías renovables, proyectando más de 6000 MW adicionales para 2031.
- Proyectos Clave: Implementación de nuevas plantas hidroeléctricas, parques eólicos, instalaciones solares y proyectos de biomasa.

Problemas Principales

- Infraestructura Desactualizada: Muchas partes de la red de transmisión y distribución necesitan modernización.
- Cobertura Eléctrica: Existen zonas rurales y aisladas que todavía no tienen acceso confiable a la electricidad.
- Pérdidas en la Red: Se destacan las pérdidas técnicas y no técnicas como un problema significativo que afecta la eficiencia del sistema.

Soluciones Propuestas

- Modernización de la Infraestructura: Renovar y actualizar las líneas de transmisión y redes de distribución.
- Tecnologías Avanzadas: Implementar tecnologías modernas para mejorar la gestión y eficiencia de la red eléctrica y generación
- Interconexión Regional: Fortalecer la interconexión con países vecinos para mejorar la estabilidad y confiabilidad del suministro de energía nacional.

4. Documentación relativa a energía del mar en Cuba

Tabla 3. Documentos recopilados.

Nº	Nombre	Contenido
1	Ley Orgánica de Eficiencia Energética 2019	Compromisos gubernamentales para elaborar medidas de cara a la mejora de la eficiencia energética.
2	Balance de energía eléctrica 2023	Tabla con datos numéricos de las producciones eléctricas de distinto tipo en Ecuador en 2023
3	Balance nacional de energía 2022	Documento detallado sobre toda la matriz energética en Ecuador en 2022.
4	Energía del Mar. Gráficos de la costa ecuatoriana. ESPOL 2024	Estudio de salinidad, gradientes térmicos y viento en las costas Ecuatorianas
5	Estudio de la energía de olas, corrientes y energía cinética de ríos en el Ecuador para la generación eléctrica. 2013	Estudio de la energía de olas, corrientes y energía cinética de ríos en el Ecuador para la generación eléctrica. 2013
6	Ley de competitividad energética 2024	Ley de competitividad energética 2024, promulgada el 11 de enero de 2024.
7	Plan Maestro de Electricidad de Ecuador.	Documento Plan Maestro de Electricidad de Ecuador de 2023.
8	Spectral and entrophy based wave energy resource assessment: a global view and point analysis in Galapagos Islands.	Artículo elaborado para Journal of Renewable Energies donde se analiza el potencial del oleaje para las islas Galápagos.
9	Revisión de estado del arte de las energías del mar en Ecuador	Revisión de estado del arte de las energías del mar en Ecuador

5. Conclusiones finales y recomendaciones

La producción de energía en el Ecuador ha estado intrínsecamente ligada al petróleo desde el auge del año 2000 y en la actualidad el panorama general no ha cambiado, por lo que urge una mayor inversión en investigación en fuentes de energías renovables como la energía del mar para favorecer la transición energética que se requiere a nivel mundial para frenar el calentamiento global.

La evaluación de la literatura realizada nos permite determinar que en el Ecuador el interés por la energía del mar como fuente renovable es reducido. Esto puede ser resultado del hecho de que el potencial de generación por medio de energía mareomotriz y undimotriz es bajo en comparación con las regiones con mayor potencial de aprovechamiento. Por ejemplo, el contenido energético del oleaje en el Ecuador es de 14 kW/m mientras que los lugares de interés a nivel mundial contemplan 90 kW/m. De igual manera las velocidades de corriente de marea en la zona costera se encuentran entre 0.8 a 1 m/s mientras que las condiciones para aprovechamiento recomendadas especifican un mínimo de 1.5 m/s. Por el contrario, en canales entre islas se tienen condiciones favorables para el emplazamiento de sistemas undimotrices. Por lo tanto, salvo ciertas excepciones, estos sistemas poseen un potencial de aprovechamiento bajo y su inversión es alta en comparación a otras fuentes renovables de energía.

Las principales conclusiones son las siguientes:

- Los índices de emisiones de CO₂ exponen que la dependencia de combustibles fósiles y la contaminación que estos generan no se ha reducido. Esto se debe principalmente a que estas fuentes de energía son subsidiadas por el gobierno lo cual garantiza que su uso sea de menor costo para la población frente a fuentes renovables de energía
- Las importaciones de combustibles demuestran que no se ha alcanzado todavía la soberanía energética. Esto permite que el país sea vulnerable frente agentes externos como conflictos armados y crisis económicas.
- La energía mareomotriz y la energía undimotriz poseen un bajo potencial de aprovechamiento en el país, ya que las condiciones existentes están por debajo de lo requerido para la operación de estos sistemas. Una excepción son los canales entre Posorja y Puná y el Canal entre Puná y la Puntilla de Jambelí, donde existe la oportunidad de generación de energía undimotriz debido a que poseen velocidades de corriente entre 3 y 4 m/s.
- La energía por gradiente de temperatura no alcanza diferenciales de temperatura mayores de 20 °C, por lo que, con las tecnologías actuales, no sería comercialmente aplicable en el país.
- Los valores de gradientes de salinidad detectados en las costas ecuatorianas sugieren que este sistema tendría un gran potencial de explotación. Se recomienda realizar mayores estudios para determinar la factibilidad de establecer emplazamientos donde se utilice estos sistemas y que tecnologías serían las más apropiadas para su explotación.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Preinversión (INP), Estudio de la energía de las olas, corrientes y energía cinética de ríos en el Ecuador, (2013).
- [2] R. Rodríguez-Santos., M. Chimbo-Campuzano, R. Rodríguez-Santos., M. Chimbo-Campuzano, Aprovechamiento de la energía Undimotriz en el Ecuador, Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología. (2017) 23–28. <https://doi.org/10.17163/ings.n17.2017.03>.
- [3] R.R. Calero Mendoza, Energía undimotriz, alternativa para la producción de energía eléctrica en la provincia de Santa Elena., (2013).
<https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/7213> (accessed October 15, 2022).
- [4] J.A. González Peñafiel, M.C. Roman Lino, J. Peralta Jaramillo, Diseño de un Prototipo Experimental de Generación Eléctrica Basado en Energía Undimotriz, Thesis, ESPOL. FIMCP., 2020. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/51620> (accessed October 15, 2022).
- [5] T.S. Cely Zavala, E.D. Chacón Campoverde, I. Saltos Andrade, Diseño y Prototipado de un Sistema Convertidor de Energía Undimotriz, Thesis, ESPOL. FIMCP., 2020.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/51570> (accessed October 15, 2022).
- [6] M.A. Cabrera Quimiz, J.E. Puente Muñoz, D. Benites, Diseño y Construcción de un Prototipo de Sistema de Conversión de Energía Oscilo-Undimotriz, Thesis, ESPOL. FIMCP, 2020. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/51567> (accessed October 15, 2022).
- [7] C.D. Rodríguez Flores, F.E. Caicedo Cevallos, Diseño de un prototipo para pruebas de conversión de energía undimotriz, (2019).
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/48511> (accessed October 14, 2022).
- [8] J.D. Saltos Pilamunga, Análisis para la generación de energía eléctrica mediante un sistema undimotriz y su aplicabilidad en el litoral del Ecuador., (2017).
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/7743> (accessed October 15, 2022).
- [9] J. Gómez-Assan, R. Ajila-Freire, Experiencias en el uso de energía renovable en la República del Ecuador, RB. 3 (2021) 2056–2060. <https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.03.29>.
- [10] PLAN MAESTRO DE ELECTRICIDAD 2016-2025, (n.d.).
<https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/plan-maestro-de-electricidad-2016-2025> (accessed October 15, 2022).

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN ESPAÑA

Marcos Lafoz Pastor (CIEMAT)
Isabel Villalba Cabrera (Universidad Las Palmas de Gran Canaria)
Adriana García Mendoza (PLOCAN)

1. Políticas energéticas en energías del mar

En España, la regulación de las energías renovables marinas en España está influenciada por la [Ley 7/2021 de 20 de mayo de Cambio Climático y Transición Energética](#) y por la actualización del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023-2030.

Por medio de esta Ley se establece la creación de dos nuevas figuras que sirven para asegurar, de manera fiable, inclusiva, transparente y predecible, el logro de los objetivos y metas para el año 2030 y para el largo plazo. Estas dos figuras son el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) y la [Estrategia de Descarbonización a largo plazo](#).

En el año 2020 España publicó su primer [Plan Nacional Integrado de Energía y Clima \(PNIEC\) para el periodo 2021-2030](#), recogiendo los compromisos de España en materia de clima y energía para la década:

- 23% de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a 1990.
- 42% de renovables sobre el uso final de la energía.
- 39,5% de mejora de la eficiencia energética.
- 74% de energía renovable en la generación eléctrica.

Posteriormente, en septiembre de 2024 se publica una [actualización de este PNIEC para el período 2023-2030](#), que incluye una revisión de los objetivos coherentes con la reducción de emisiones adoptada a nivel europeo:

- 32% de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero respecto a 1990
- 48% de renovables sobre el uso final de la energía
- 43% de mejora de la eficiencia energética en términos de energía final
- 81% de energía renovable en la generación eléctrica
- Reducción de la dependencia energética hasta un 51%

Referente a las energías oceánicas, en una de las medidas del PNIEC se propone la revisión y simplificación de procedimientos administrativos, adecuando el procedimiento administrativo para las instalaciones de generación eléctrica en el medio marino, a partir de la energía eólica y las oceánicas, con particular atención a la reducción de plazos de tramitación para plataformas de ensayos y proyectos de I+D+i.

En cuanto a la adecuación de la infraestructura eléctrica, el PNIEC contempla la necesaria planificación de infraestructuras eléctricas en el medio marino asociadas al despliegue de la eólica marina y, en menor medida, de las energías oceánicas.

Por otro lado, dentro de este marco estratégico se han desarrollado una serie de iniciativas de carácter estratégico, al objeto de identificar los retos y las oportunidades que se plantean en los distintos ámbitos sectoriales y tecnológicos, como es la [Hoja de ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar en España](#), orientada a potenciar el liderazgo español en el desarrollo tecnológico y de la I+D de las distintas fuentes limpias que aprovechan los recursos naturales marinos, con especial atención a la eólica. También garantiza

el despliegue ordenado de las instalaciones en las aguas territoriales, de modo que sea respetuoso con el medio ambiente, compatible con otros usos y actividades y se aproveche para mejorar el conocimiento del medio marino.

Esta hoja de ruta establece los siguientes objetivos de desarrollo de las energías marinas en España a 2030:

- Eólica marina: De 1 a 3 GW
- Otras energías del mar: de 40 a 60 MW

Para la consecución de estos objetivos y por consiguiente el despliegue de las energías marinas en España se identifican tres elementos clave:

- Ordenación del espacio físico para los proyectos
- Capacidad de acceso y conexión al sistema eléctrico
- Modelo de negocio

En cuanto a [Ordenación del Espacio Marítimo](#) (OEM), el Real Decreto 150/2023, de 28 de febrero, aprueba los planes de ordenación del espacio marítimo de las cinco demarcaciones marinas españolas, diferenciando en cada una de ellas Zonas de Uso Prioritario (ZUP) y Zonas de Alto Potencial (ZAP).



Figura 1. Planes de Ordenación del Espacio Marítimo en España

Aunque no se hace mención específica a las energías oceánicas o del mar, el desarrollo de las mismas se puede encajar en:

- Zonas de uso prioritario para investigación, desarrollo e innovación (I+D+i)
- Zonas de alto potencial para la investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) de tecnologías renovables marinas.
- Zonas de alto potencial para el desarrollo de la energía eólica marina de carácter comercial, sin perjuicio de que tales proyectos puedan contemplar hibridaciones con otras tecnologías renovables marinas.

En España el transportista y operador único del sistema eléctrico (TSO) es Red Eléctrica. La planificación de la red de transporte es una herramienta fundamental para la materialización del PNIEC. Actualmente se encuentra vigente la [planificación 2021-2026](#), y ya se encuentra en desarrollo la planificación 2025-2030.

En cuanto a la regulación sobre **generación de energía eléctrica en el mar** el [Real Decreto 962/2024](#), de 24 de septiembre, regula la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en instalaciones ubicadas en el mar. El objetivo de este real decreto es la de regular la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en instalaciones ubicadas en el mar, en lo relativo al **procedimiento de concurrencia competitiva** necesario para su autorización.

Como aspectos más relevantes del Real Decreto se destacan:

- En el ámbito de aplicación estarán incluidas las instalaciones de eólica marina y **otras energías renovables en el mar, como la undimotriz**, y se limitarán a las Zonas de Alto Potencial (ZAPER) establecidas en los Planes de Ordenación del Espacio Marítimo (POEM).
- Las instalaciones eólicas marinas son consideradas como una instalación de producción de energía eléctrica perteneciente al subgrupo b.2.2, mientras que las **instalaciones renovables marinas** estarán incluidas dentro de la **categoría b)**, definido en el artículo 2.1 del RD 413/2014 *-fotovoltaica, eólica y termosolar-*.
- Se definen los aspectos más relevantes que deberán tener las bases de la Orden que se apruebe para el **procedimiento de concurrencia competitiva**.
- Se definen también algunos de los aspectos que deberá disponer la **Orden ministerial por la que se convoquen los concursos**. Las instalaciones adjudicatarias, se acogerán al **régimen económico de las energías renovables** y tendrán garantizada tanto la reserva de capacidad de acceso en un nudo concreto de la red de transporte, como la prioridad en el otorgamiento de la concesión de ocupación del dominio público marítimo-terrestre.
- Las **instalaciones renovables marinas innovadoras** no requerirán participar en los concursos, que puedan estar fuera de las zonas ZAPER, podrán iniciar los procesos administrativos siempre que las **instalaciones renovables marinas no eólicas no superen los 20 MW**.

En cuanto a la protección del medio ambiente, en España existe la [Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental](#). Esta ley distingue entre evaluación ambiental estratégica ordinaria y simplificada, según el tipo de proyecto del que se trate. Aunque no se hace mención específica a las energías renovables marinas, en su Anexo II sobre *Proyectos sometidos a la evaluación ambiental simplificada*, la presente ley menciona en el apartado i) del Grupo 4. *Industria energética* a las “*instalaciones para la producción de energía en medio marino y en*

aguas de transición" por lo que podría entenderse que los proyectos de energías marinas estarían sometidos a la tramitación simplificada.

En lo relativo a la cadena de valor, España cuenta con un sólido conocimiento de la cadena de suministro de la eólica terrestre, que puede ser extrapolado tanto a la eólica marina como a las energías oceánicas. En este sentido el país cuenta con fuertes capacidades industriales en el sector de la construcción naval e industrias auxiliares, así como el de los sistemas eléctricos.

España cuenta con empresas pioneras en diseño y construcción de grandes estructuras de eólica marina, participando en grandes proyectos internacionales, suponiendo una gran oportunidad para la diversificación del negocio de la industria naval. Esta experiencia ganada con la eólica marina puede ser fácilmente extrapolable a la construcción de un parque comercial de energías oceánicas.

Además de los astilleros los puertos españoles cuentan con un papel fundamental en el desarrollo de las renovables marinas, reuniendo algunas las condiciones para convertirse en centros logísticos para el almacenaje de grandes piezas, premontaje y embarque de las mismas para su transporte al punto de instalación final. Los requisitos que deben reunir los puertos son muy variados según se utilicen para actividades de fabricación, operación y mantenimiento o almacenaje, acceso de embarcaciones de grandes capacidades o buques especializados, entre otros.

En otra parte de la cadena de valor se destacan también los estudios de ingeniería involucrados en el desarrollo de proyectos de eólica marina a nivel internacional, así como la infraestructura ya existente para la construcción de equipamiento tanto para eólica terrestre como marina, que podrían adaptarse para acomodar los requisitos de las energías renovables marinas.

Hasta la fecha, la experiencia ganada en la cadena de valor de las renovables marinas española ha sido gracias a la participación en grandes proyectos internacionales, o bien a la participación en proyectos de I+D+i que se han probado en los bancos de ensayo españoles destinados a tal fin, pero no a la construcción de parques comerciales en aguas españolas. Por tanto, el desarrollo de la cadena de valor depende en gran parte de la presencia de proyectos comerciales, que hará que muchas empresas aprovechen su know how en otras áreas (construcción naval, oil and gas, eólica terrestre, etc.), abriendo paso también a la diversificación de sus actividades.

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con las energías del mar

El documento: ***“Hoja de ruta para el desarrollo de la eólica marina y de las energías del mar en España”*** publicado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) en el año 2021, presenta de manera resumida el diagnóstico actual y las futuras líneas de desarrollo de las energías del mar en España.

Tomando como base la hoja de ruta establecida por Europa y las directrices marcadas en el documento: ***“Hoja de ruta para el desarrollo de la eólica marina y de las energías del mar en España”***, España se ha marcado como objetivo de desarrollo de las Energías marinas en España a 2030 lograr entre 1 GW y 3GW de potencia instalada de eólica marina y entre 40MW y 60MW para el resto de las energías del mar.

Estos objetivos se plantean en vista a los resultados obtenidos en 3 ejes fundamentales para el desarrollo de las energías del mar: el potencial que presenta España de **recurso** renovables, la existencia de **instalaciones experimentales** que permiten el desarrollo de **proyectos en fase de I+D** y la **capacidad industrial** para la ejecución de proyectos a gran escala.

Este documento describe el potencial que presenta España en energías del mar entorno a los 3 ejes anteriores dividido también por tecnologías: **eólica marina, energía solar fotovoltaica flotante y energías de las fuentes de energías del mar: energía undimotriz, gradiente térmico, mareas, corrientes y gradiente salino.**

En lo relativo al recurso de las energías del mar España presenta un potencial significativo para las tecnologías anteriormente citadas.

Para el caso de la **eólica marina**, dentro del documento: ***“Atlas Eólico de España”*** desarrollado por el IDAE en 2008, se encuentran identificadas las zonas marinas de España que cuentan con un recurso eólico significativo. En concreto, zonas que presentan una velocidad media superior a los **6.5 m/s a 100 metros de altura sobre el nivel del mar**. Estos parámetros se han estimado como mínimo potencial técnico para la implantación de instalaciones de eólica marina. Dentro del documento encontramos un apartado especial dedicado a las islas Canarias, en donde se pone en valor en recurso eólico de este territorio, pero se aportan otros aspectos claves a tener en cuenta para evaluar el potencial técnico de la eólica marina: datos batimétricos, compatibilidad de usos, valores o figuras de protección ambiental entre otros.

En el caso de las tecnologías en eólica marina, en el caso de España las características limitantes de su plataforma continental, en la que la profundidad de las aguas es muy elevada a distancias muy cortas con respecto de la costa, ha dificultado el despliegue de las tecnologías de eólica marina con cimentación fija, la solución más consolidada a nivel europeo. Sin embargo, la madurez tecnológica de las soluciones flotantes va a permitir que se pueda materializar el despliegue de la eólica marina en aguas españolas. De las 27 soluciones flotantes desarrolladas a nivel mundial, 7 son patentes españolas lo que demuestra que las empresas españolas han apostado por esta solución de diseño frente a la opción de la cimentación fija.

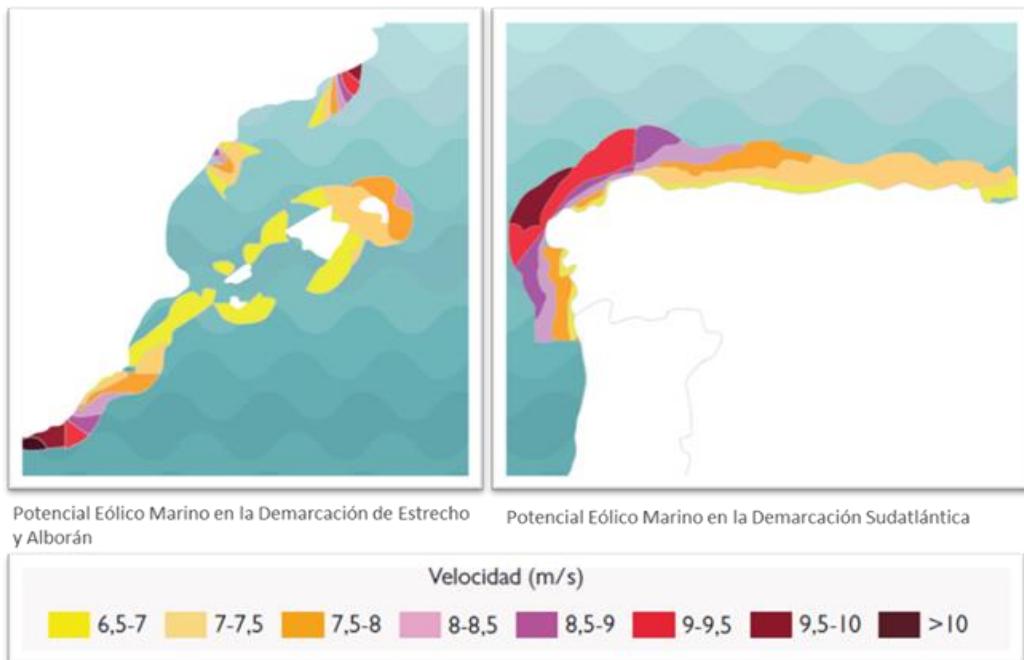


Figura 2. Potencial recurso eólico marino en España por zonas.

Para el bloque denominado energías de las fuentes de energías del mar en lo relativo al recurso en España la energía undimotriz o energía de las olas es la que presenta unos resultados más favorables.

En España, **la energía undimotriz** dispone de recurso de gran calidad. La zona de Galicia en el norte de la península ibérica presenta los valores de potencial de energía más elevados, con potencias medias entre **40-45 kW/m**. En el mar Cantábrico es la segunda zona del litoral español en cuanto a potencial de recurso alrededor de **30kW/m** y en tercer lugar el frente norte de las Islas Canarias con **20 kW/m**.



Figura 3. Potencial de recurso undimotriz en España por zonas.

Como complemento a la hoja de ruta existen documentos de estudios relativos al recurso particularizados a un tipo de energía del mar como por ejemplo el ***“Estudio del potencial de las olas”*** publicado también por el IDAE.

Como consecuencia de estos resultados favorables en relación con el recurso undimotriz, en España se han desarrollado en la última década proyectos de investigación y desarrollo de diferentes tecnologías de energía undimotriz. Así encontramos como proyectos más destacados: la **Planta de Energía de Olas de Mutriku de 296 kW** ubicada en el dique exterior del Puerto de Mutriku en el País Vasco, basada en la tecnología Columna de Agua Oscilante (OWC en sus siglas en inglés), por ser la primera instalación comercial en el mundo que funciona inyectando a red energía eléctrica generada por las olas. Desde su puesta en marcha en 2011 esta planta ha funcionado ininterrumpidamente. Y el **proyecto** desarrollado en la plataforma de ensayos de BIMEP en 2016 en donde se instaló el primer **dispositivo flotante tipo absorbedor puntual de 30kW** que ha durado **3 años** consecutivos en el agua de mar en condiciones de operación real.

Del resto de energías del mar, en España destacan también la **energía de las corrientes de marea**. La zona del estrecho de Gibraltar y las corrientes gallegas en donde se encuentran las velocidades necesarias para el funcionamiento de estas tecnologías.

Para la energía de amplitud de las mareas, el gradiente térmico o energía maremotérmica se han realizado estudios concluyendo que España no reúne las condiciones necesarias en relación con el recurso para el correcto aprovechamiento de estas energías del mar.

En el caso de la **energía de gradiente salino**, se han empezado a hacer estudios preliminares y no se descarta que exista potencial a considerar, en especial en las zonas costeras de las desembocaduras de los grandes ríos españoles como el Ebro y en las zonas costeras donde se encuentran ubicadas las grandes plantas de desalación ya que España es referente europeo y mundial en el área de la desalación de aguas.

Finalmente, para el caso de la **energía solar fotovoltaica flotante (“flotovoltaica”)** encontramos datos relativos a instalaciones en fase de I+D, como la planta conectada a red sobre el **embalse** de Sierra Brava (Cáceres) con una potencia de **1,125 MW** formada por cinco sistemas flotantes adyacentes o el **proyecto europeo BOOST** (Bringing Offshore Ocean Sun to the global market) que se desarrollará en las instalaciones de la Plataforma Oceánica de Canarias (PLOCAN) en donde se ensayarán un sistema de planta fotovoltaica inspirado en la tecnología de flotación y amarre utilizado en por la industria Noruega en piscicultura.

Unido a los resultados favorables en relación del recurso en las diferentes tecnologías de energías del mar, el que exista una presencia importante de proyectos de I+D en España dedicados a la investigación, ensayo y desarrollo industrial de tecnologías de energías del mar es debido a que en España existen **instalaciones para la I+D+i de las energías del mar** adecuadas para la realización de actividades en las diferentes fases de desarrollo tecnológico.

En España, existen canales de ensayos entre los que destaca el del Instituto Hidráulico de Cantabria (<https://www.bimep.com/>), laboratorios experimentales como el HarshLab en BIMEP (<https://harshlab.eu/>) o el Marine Corrosion Test Site (MCTS) en Cantabria (<https://centrotecnologicoctc.com/laboratorio-marino-mcts-el-bocal/>), .

Pero sin duda las instalaciones más destacables son las 3 instalaciones para ensayos en mar que presentan la posibilidad de conexión a la red eléctrica: BIMEP en la región del País Vasco (norte de España), Punta Langosteira en Galicia y Plataforma Oceánica de Canarias (PLOCAN) (<https://plocan.eu/>) en las islas Canarias. Estas infraestructuras están agrupadas por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del programa de Infraestructuras Técnico-Singulares (ICTS), MARTHIS (Mari-time Aggregated Research Hydraulic Infrastructures. Según el informe recién publicado “An overview of Ocean Energy Activities in 2020” de la AIE, **España es el país de la Unión Europea con más instalaciones para la I+D+i para las energías marinas.**

En el caso de BIMEP en funcionamiento desde el año 2015 presenta un área acotada restringida de navegación de 5.3 km², con conexión a red, condiciones batimétricas de 50-90 m de profundidad. Presentando una capacidad total de 20MW distribuidos en 4 cables submarinos de 5 MW cada uno.

La zona experimental de Punta Langosteira en Galicia puesta en marcha en 2015 es considerada la segunda zona experimental del mundo con mayor concentración de energía undimotriz por detrás de la costa sur de Gales. Este espacio está gestionado por el Instituto Enerxético de Galicia (INEGA). Formando un consorcio con otros países europeos como Portugal o Francia tiene como objetivo habilitar de cara a 2030 un espacio de 2.6 km² a una distancia de entre 20-60m de la costa gallega cerca del Puerto de A Coruña, alcanzando profundidades de hasta 500m.

Por otro lado, PLOCAN es una instalación que forma parte del Mapa de Infraestructuras Científico-Técnicas Singulares (ICTS), ubicada a 1.5 km de la costa de la isla de Gran Canaria, presenta un área reservada en mar de 23 km² e instalaciones en tierra equipadas como talleres de electrónica, mecánica, logística, incluyendo un laboratorio húmedo con un tanque de agua salada. Dispone de 2 cables eléctricos submarinos con una potencia máxima de 15MW. Uno de los módulos principales de 5MW está destinado a convertidores de energía de undimotriz y otro módulo de gran potencia reservado para las tecnologías de eólica marina.

Estas instalaciones han sido vitales en el éxito de numerosos proyectos de I+D en energías del mar desarrollados en España, por empresas nacionales e internacionales como Corpower, Carnegie, Tecnalia o Wedge Global. Consolidando la posición de España como una opción de éxito como laboratorio de ensayos en entorno real para las tecnologías de energías del mar internacionalmente.

Todo lo anteriormente citado se apoya en la capacidad industrial que presenta España alrededor de la industria de las energías renovables del mar.

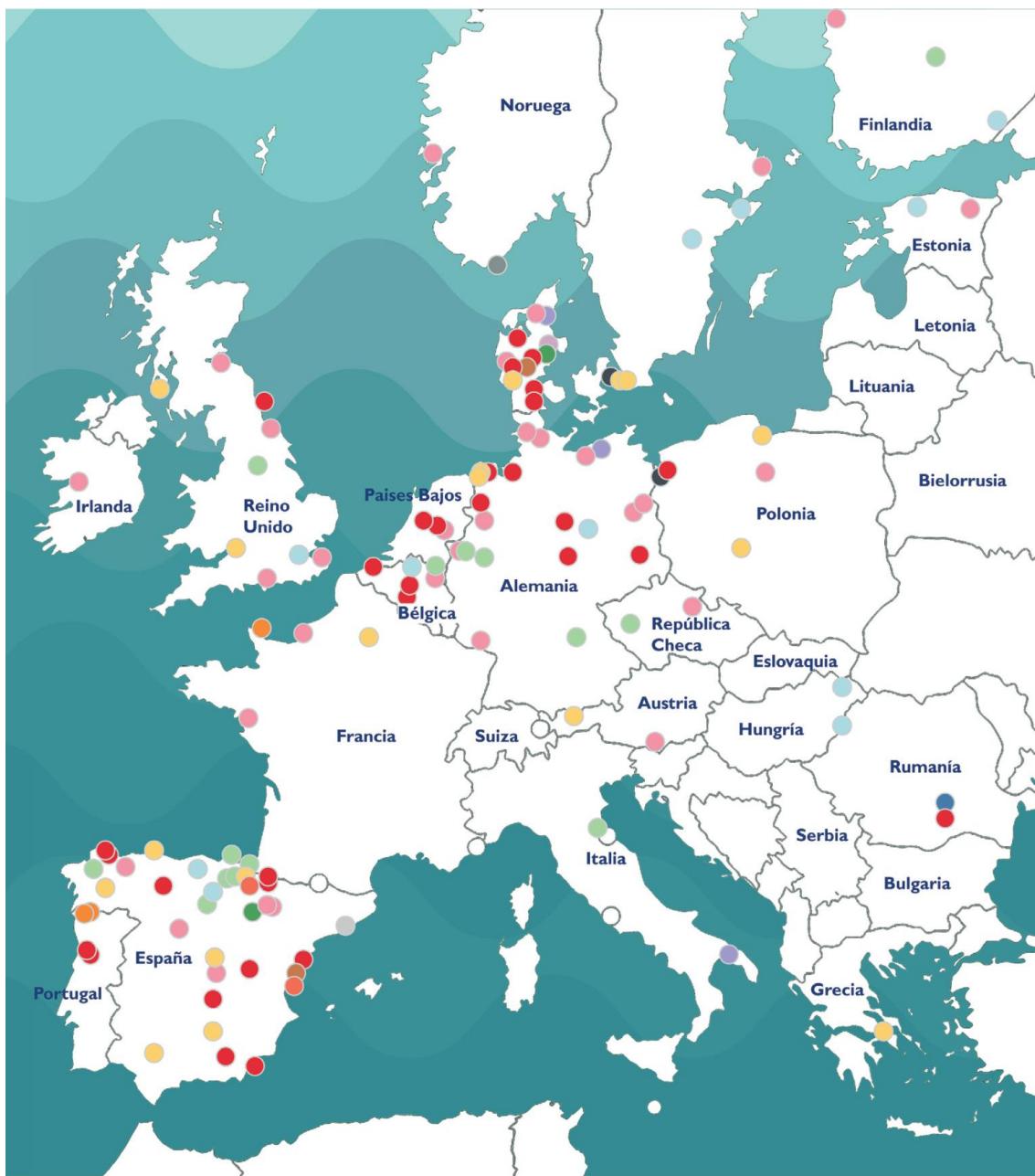


Figura 4. Instalaciones para la I+D+i de las energías en el mar en España.

España presenta sinergias con otros sectores estratégicos de España como son la industria de construcción naval (astilleros), el sector marítimo portuario y la ingeniería civil. Así es el caso del sector industrial español que se ha dedicado al desarrollo de la eólica terrestre y que ha hecho posible que en España existen más de 800 patentes desde el año 2006 en relación con la eólica terrestre, siendo el sexto país del mundo y tercero de la Unión Europea en este indicador según el Anuario eólico 2020 publicado por AEE. España posee actualmente el mayor número de instalaciones de fabricación de componentes de energía eólica de Europa según Wind Energy Technology Market Report-JCR. Este sector industrial ya consolidado sienta las bases para que el desarrollo de la eólica marina sea un éxito en España.

Por otro lado, España posee un entramado empresarial propio del sector logístico portuario, para la utilización y reconversión de las infraestructuras portuarias tanto para la fabricación como el montaje de componentes, así como las labores de mantenimiento de los futuros parques de las diferentes tecnologías de energías del mar.

Así tenemos el ejemplo en las islas Canarias del conjunto de empresas que forman parte del Clúster Marítimo de Canarias (<https://www.clustermc.es/>) que actualmente están dando cobertura a la industria de las energías renovables marinas participando activamente en proyectos de I+D+i en colaboración con PLOCAN y empresas privadas del sector.



COMPONENTES DE TURBINAS EÓLICAS

Generadores	Ensamblaje de góndolas	Palas y Torres
Convertidores de potencia	Bujes y ejes	Ensamblaje de Palas y Góndolas
Sistemas de control	Rodamientos	Ensamblaje de Generadores y Góndolas
Torres	Cimentaciones	Ensamblaje de bujes, ejes y góndolas
Multiplicadoras	Fundiciones	Piezas de recambio y reparación
Palas	Palas y generadores	Piezas de recambio y reparación y ensamblaje de góndolas

Figura 5. Instalaciones de fabricación de componentes de energía eólica marina en Europa.

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de nuevas energías renovables

La integración de energías renovables en un sistema eléctrico de potencia supone nuevos desafíos en su operación. Algunos de estos están relacionados con las características inherentes del propio sistema. En este sentido, cabe destacar para el caso del sistema eléctrico español el alto grado de aislamiento, que lo convierte prácticamente en una isla energética desde el punto de vista eléctrico.

El grado de interconexión del sistema español con el sistema europeo es muy reducido. Esto se pone de manifiesto con la relación entre la capacidad de importación de energía del exterior y la capacidad instalada, que para el caso de España es inferior al 5%, valor ligeramente superior a la relación del sistema eléctrico del Reino Unido, pero claramente inferior al mínimo exigido en el objetivo establecido por la Comisión Europea (Barcelona, 2002), el cual recomendaba una capacidad de interconexión de al menos el 10% para el año 2005. La mayoría de esta capacidad de interconexión está establecida con el sistema eléctrico portugués, cuyo tamaño es reducido y generalmente presenta las mismas necesidades en el mismo momento que el sistema español. La relación efectiva de interconexión del sistema ibérico con el sistema eléctrico europeo es del 1,5%, utilizando el mismo cálculo que en la ratio anterior, pero teniendo en cuenta tan solo la capacidad de importación a través de la frontera francesa. Por lo tanto, el incremento de la capacidad de interconexión con el sistema europeo se ha convertido en uno de los objetivos principales de **Red Eléctrica de España como operador del sistema**.

Cabe destacar que a medio plazo está prevista la construcción de una nueva interconexión con Francia en corriente continua que prácticamente duplicará la actual capacidad de interconexión. Esta nueva interconexión, junto con el establecimiento de un Mercado Interior de la Electricidad para Europa permitirá la integración más eficiente de energías renovables. Sin embargo, esta medida, necesaria como se ha indicado, no deja de ser insuficiente para la integración del gran contingente de generación renovable previsto para horizontes a más largo plazo.

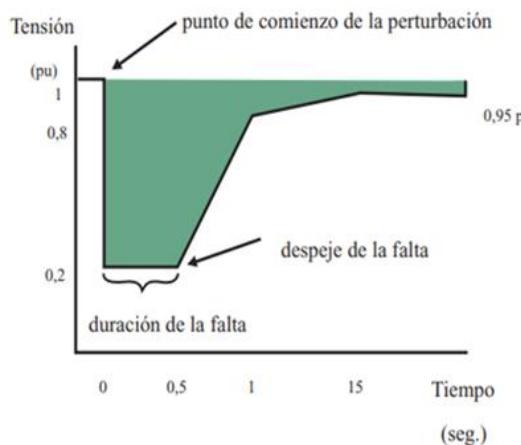
La segunda característica propia del sistema eléctrico español que supone un desafío para la integración de energías renovables es la morfología de la **curva de carga**. Dicha curva varía en función de la época del año, día de la semana, temperatura, etc. Sin embargo, su característica más destacable es la diferencia en el consumo en las horas punta y valle, lo cual se traduce en un elevado valor del cociente entre el máximo y el mínimo consumo (del orden de 1,7, mientras que en otros sistemas eléctricos europeos está en torno a 1,3). Esta característica se explica en gran medida por el relativo bajo peso de la industria española, con consumos que pueden ser mantenidos durante todo el día, dentro del consumo energético español, ya que la demanda doméstica y comercial se concentra en unas determinadas horas del día, mientras que en otras es mucho más baja.

Como consecuencia de esto, las unidades de producción de energía eléctrica gestionables deben funcionar en un régimen más exigente y con una mayor flexibilidad, al ser

las encargadas principales de seguir la curva de carga a lo largo del día. Esta exigencia se ha visto incrementada aún más en los últimos años **por el contingente de energías renovables que se ha venido instalando en el sistema y la prioridad de funcionamiento respecto al resto de tecnologías.**

Como ejemplo el comportamiento de la generación eólica durante los valles de demanda (con mayor probabilidad de producciones elevadas) y durante las puntas de consumo (con mayor probabilidad de producciones menores). En estas ocasiones, una elevada producción de eólica en las horas valle supone un menor hueco para las tecnologías gestionables, lo cual exige que estas trabajen al mínimo técnico de su funcionamiento o incluso, en condiciones extremas, su desconexión de la red. De forma opuesta, en las horas punta, la menor producción de la eólica implica que la cobertura de la demanda deba ser realizada por la generación gestionable. Con objeto de analizar y cuantificar este efecto, Red Eléctrica de España ha definido un nuevo parámetro para representar el hueco de producción disponible para la generación gestionable (Requerimiento para la generación gestionable).

Curva tensión-tiempo envolvente de huecos que deben soportar las instalaciones eólicas de acuerdo al PO 12.3



Ejemplo extensión geográfica del hueco de tensión en el sistema eléctrico peninsular español provocado por un cortocircuito en una SE (Subestación Eléctrica) de 400 kV

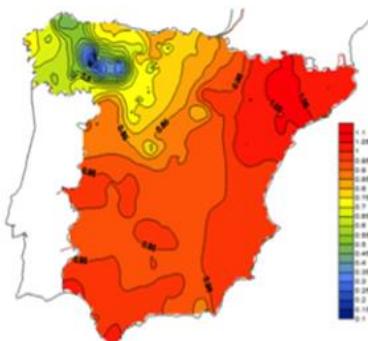


Figura 6. Gráfica de requisitos frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas y ejemplo de extensión del hueco en el sistema eléctrico peninsular provocado por un cortocircuito.

Actualmente REE presenta una serie de documentos denominados **procedimientos de operación** en donde se establecen las directrices de operación y regulación del sistema eléctrico español tanto peninsular como el de las islas (territorios extra peninsular) ante diferentes situaciones a las que el sistema eléctrico puede verse afectado. Dentro de estos procedimientos se ha considerado la integración de las energías renovables.

Así encontramos el primer documento al respecto del año 2006 denominado: **Resolución-P.O. 12.3 "Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas"**, que principalmente impuso un requisito de capacidad de permanencia durante huecos de tensión (LVRT) hasta cero voltios y limitó la potencia activa y reactiva durante fallos. Este

documento se centraba en parques eólicos conectados a redes de distribución a niveles de potencia bajos.

Más adelante, en 2008 apareció un segundo anexo llamado Anexo **P.O.12.2 "Requisitos técnicos de las instalaciones eólicas, fotovoltaicas y todas aquellas instalaciones de producción cuya tecnología no emplee un generador síncrono conectado directamente a la red"**, que se aplica a plantas eólicas o fotovoltaicas mayores de 10 MW, válido para todos los proyectos instalados después del 1 de enero de 2011.

En ese tipo de plantas, las restricciones desde el punto de vista de la red eléctrica están establecidas en base a los siguientes aspectos técnicos destacando aspectos como lo establecido en el **RD 661-2007** en cuanto a las desviaciones de frecuencia y tensión que establece que la frecuencia nominal es de 50 Hz y permite un rango de frecuencias de 48 a 51,5 Hz, con desconexión para frecuencias inferiores a 48 Hz durante más de 3 segundos. El tiempo de desconexión para frecuencias superiores a 51,5 Hz debe ser acordado con el TSO. También se especifican protocolos específicos para el control de la potencia activa, reactiva o los huecos de tensión.

Siguiendo directrices del operador del sistema europeo (ENTSOE), en un futuro próximo, a las plantas de renovables, y por tanto también las marinas, se les exigirá **participar en el control dinámico de frecuencia (emulación de inercia)**. España ya contempla dichas recomendaciones dentro de sus códigos de red, facilitando el marco normativo ante la futura integración de las energías renovables marinas en su sistema eléctrico, en especial la eólica marina.

Estos procedimientos de operación dotan de un marco normativo al transporte de la energía en España ante la integración de las energías renovables en su sistema eléctrico, garantizando la operación del sistema y su fiabilidad.

En base a los documentos anteriormente citados España ya está trabajando en un **"Plan de desarrollo de la red de transporte de la energía eléctrica (2021-2026)"**. En este documento la nueva red eléctrica española incorpora nuevos aspectos derivados del nuevo contexto de transición energética y de la búsqueda de una mayor transparencia y objetividad, basada en:

Diseño del desarrollo de la red de transporte centrado en posibilitar la integración de la generación renovable establecida en el PNIEC ubicada en zonas de mayor recurso y menor impacto ambiental.

La utilización de herramientas de cálculo avanzado basadas en un análisis exhaustivo de situaciones posibles en la red de transporte en todas las horas del año, frente a los análisis deterministas convencionales.

La incorporación de elementos en la red de transporte que aprovechan los últimos desarrollos tecnológicos disponibles, como respuesta a las necesidades de flexibilidad del sistema y de un mayor uso de la red existente, como es el caso del almacenamiento de energía.

Manteniendo la red eléctrica de partida y mejorando los procedimientos de operación descritos anteriormente, en **2026 se tendría una integración de renovables de un 62 % del valor total de generación eléctrica**, 6 puntos porcentuales por debajo del 68 % planificado por el PNIEC, y con unos vertidos de producción renovable de cerca del 15%. Con una red eléctrica sin limitaciones, sí se cumplirían los objetivos establecidos en el PNIEC y el vertido se reduciría al 2,4 %, sin embargo, esta red tendría un alto impacto social, ambiental y un elevado coste de inversión.

En un punto de compromiso entre ambos extremos se sitúa la red de transporte planificada, la cual permite una integración de renovables del 68 % en el sistema eléctrico peninsular, en línea con los objetivos establecidos, limitando los vertidos a un 4 %, valor alineado con las recomendaciones europeas.

El coste de inversión estimado del conjunto de actuaciones incluidas en el Plan de desarrollo de la red de transporte 2021-2026 es de 6.964 M€, de los cuales 1.260 M€ servirán para reforzar las interconexiones internacionales con Francia (Golfo de Vizcaya), Portugal (Interconexión norte), Marruecos (tercer enlace) y Andorra, y 5.704 M€ a actuaciones de refuerzo de la red de transporte que componen el sistema eléctrico nacional, tanto incluidas en la red de partida como en la red planificada. Adicionalmente, aunque resulta inviable plantearlas por motivos constructivos o económicos, se han identificado otras actuaciones como enlaces adicionales entre islas, como entre Mallorca y Menorca o Gran Canaria y Fuerteventura, así como dos nuevas interconexiones con Francia por la zona central de los Pirineos.

4. Documentación relativa a energías del mar

<i>España</i>		
<i>Num</i>	<i>Nombre del documento</i>	<i>Contenido del documento</i>
1	Estudio del potencial de las olas- IDEA-2020	Estudio completo del recurso marino en energía del oleaje en las costas españolas
2	Hoja de Ruta para el desarrollo de Eólica Marina y Energías del Mar-España -534163	Hoja de Ruta para el desarrollo de Eólica Marina y Energías del Mar en España
3	D6_Estrategia_Energias RenovablesMarinasCANARIAS	Ejemplo concreto del estudio del recurso marino en las Islas Canarias, así como hoja de ruta en energías marinas. (hoja de ruta, punto 6, páginas 84-110)

4	Plan REE 2021-2026_Sumario_ejecutivo_v0	Plan de desarrollo de la Red de Transporte de Energía Eléctrica Período 2021-2026
5	Offshore-Grid connection requirements	Documento de Amprion que describe los requisitos técnicos mínimos para conectar un sistema a una red offshore (Punto 5. páginas 16-34)
6	D2.26-Collation of European grid codes final report-1	Resultados del Proyecto MARINET sobre el cumplimiento de los grid codes de energías marinas. (páginas 22 a 26 para el caso de España y de 31 a 39 para análisis comparativo y futuro)
7	Grid_codes_d3.4 oct2020_0	Grid codes: recommendations for connection of offshore wind power
8	RD 150-23 POEM	BOE en el que se aprueba la ordenación de las 5 demarcaciones marinas españolas
9	JRC135021_01	Status report on technology, trends, value chains &markets in Ocean Energy in European Union. A nivel de toda Europa, no hay separación por países.

5. Conclusiones finales y recomendaciones

En base a la legislación analizada, puede decirse que España está avanzando en el desarrollo de energías oceánicas, contando con un marco normativo en evolución y ambicioso en cuanto a objetivos, que promueve la sostenibilidad y la innovación en el sector energético.

El **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)** 2021-2030 refuerza estos objetivos, estableciendo metas específicas para la integración de energías renovables en el mix energético nacional. Aunque la eólica marina tiene un papel destacado, el PNIEC también reconoce el potencial de otras energías oceánicas para contribuir a la diversificación energética y la reducción de emisiones.

La **Hoja de Ruta para el Desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar**, aprobada en 2021, incluye objetivos específicos para tecnologías como la undimotriz y la energía de las mareas, con la meta de alcanzar hasta 60 MW de capacidad instalada para 2030.

Cabe destacar la importancia de contar con planes de **ordenación del espacio marítimo (OEM)**, que aseguran que las instalaciones de energías del mar se desarrollen de manera compatible con otros usos del mar y respetando el medio ambiente.

Además, la **planificación de Red Eléctrica para 2021-2026** incluye la integración de energías renovables marinas en la red eléctrica nacional. Aunque la eólica marina es prioritaria, se prevén inversiones en infraestructuras que también beneficiarán a otras energías oceánicas.

Los esfuerzos del Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico se materializan en el **RD 962/2024 por el que se regula la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en instalaciones ubicadas en el mar**. Si bien esta publicación es un hito importante para el sector, aún faltan por publicar las Órdenes Ministeriales que regulen los procedimientos de concurrencia competitiva, como las áreas disponibles, cupos de potencia, criterios de adjudicación, así como el propio calendario de los concursos.

En resumen, España está bien posicionada para liderar el desarrollo de energías oceánicas en Europa, si bien la implementación efectiva de estos planes y regulaciones va a ser crucial para alcanzar los objetivos de descarbonización y sostenibilidad a largo plazo.

España cuenta con un **gran potencial undimotriz** gracias a sus extensas costas. Las zonas con mayor potencial se encuentran en Galicia, el Mar Cantábrico y las Islas Canarias con potencias medias que van desde los 45 a los 20 kW/m. De ser aprovechado, este potencial podría contribuir significativamente a la diversificación y sostenibilidad del mix energético español.

España es el país de la Unión Europea con más instalaciones para la I+D+i para las energías marinas. Los bancos de ensayo de Bimep y PLOCAN cubren un amplio espectro de condiciones reales a las que tiene que enfrentarse un dispositivo de energías oceánicas, desde las duras condiciones del Mar Cantábrico a las grandes profundidades del Océano Atlántico respectivamente. Gracias a los proyectos de I+D+i en los que han participado y participan ambas entidades, se ha estrechado la colaboración entre el sector público y las empresas que participan en estos proyectos, ganando experiencia sobre los requerimientos y necesidades del sector y cubriendo toda la cadena de valor, desde la gestión del proyecto, pasando por la fabricación, transporte y puesta en marcha, operación y mantenimiento y desmantelamiento de los dispositivos.

España cuenta **con** consolidadas industrias de la **construcción naval, del sector marítimo portuario, logístico, fabricación de componentes** para energía eólica, entre otros, que cuentan con amplia experiencia en proyectos internacionales y en concreto de energía eólica marina, por lo que no será difícil su adaptación a los requerimientos de grandes proyectos de energías oceánicas.

Como recomendaciones generales para fortalecer el desarrollo de las energías oceánicas en España se propone:

1. **Incentivar la inversión y financiación:** impulsar la creación de programas de incentivos fiscales y subvenciones específicas para proyectos de energías oceánicas, facilitando el acceso a financiación tanto pública como privada.
2. **Simplificación de la regulación y permisos:** agilizar los procesos de obtención de permisos y asegurar que la normativa sea clara y predecible, reduciendo las barreras administrativas para el desarrollo de proyectos en un tiempo razonable, reduciendo la incertidumbre entre los inversores y promotores.
3. **Agilizar la convocatoria de los concursos de concurrencia competitiva:** si bien se cuenta con un marco normativo para la regulación de la producción de energía en el mar, aún se desconoce cuándo tendrán lugar los primeros concursos, así como las áreas disponibles y los criterios de adjudicación.
4. **Apoyo a la I+D+i:** Continuar y reforzar los programas de apoyo a la investigación, desarrollo e innovación española, canalizando las inversiones en personal investigador, equipamiento e infraestructuras a través de centros de investigación, canales y bancos de ensayo.
5. **Desarrollo de infraestructuras y logística:** mejorar las infraestructuras portuarias y logísticas necesarias para la instalación y mantenimiento de dispositivos marinos, asegurando que las instalaciones puedan operar de manera eficiente y segura.
6. **Promover la sostenibilidad y el impacto ambiental positivo:** implementar medidas que aseguren que el desarrollo de energías oceánicas sea compatible con la protección del medio ambiente marino, asegurando también la compatibilidad y la coexistencia con las distintas actividades marino-marítimas que se desarrolle en la zona.
7. **Fortalecer la cadena de valor industrial:** apoyar a las industrias nacionales en la adaptación y desarrollo de capacidades para participar en proyectos de energías oceánicas, aprovechando la experiencia previa en construcción naval y eólica marina.
8. **Educación y formación:** desarrollar programas específicos de formación y capacitación que se adapten a las necesidades del sector de energías oceánicas, que den lugar a la generación de empleo de calidad con trabajadores altamente cualificados.

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN MÉXICO

Emiliano Gorr Pozzi (Universidad Autónoma de Baja California)
Héctor García Nava (Universidad Autónoma de Baja California)
Francisco Ocampo Torres (CICESE)

1. Políticas energéticas en energías del mar y renovables.

En México, no existe una reglamentación particular para energías renovables marinas (ERM). A pesar del esfuerzo en investigación, innovación y desarrollo, aportado por grupos académicos e industriales mexicanos, no existe un marco regulatorio para el despliegue de dispositivos ERM. Desde el punto de vista administrativo, los principales obstáculos que atraviesa la industria MRE son la falta de coordinación entre las autoridades que regulan la zona costera y marina y las barreras regulatorias, administrativas y financieras [1]. Sin embargo, la inclusión de energías renovables (ER) en la matriz energética se regula a través de leyes a diferentes niveles, a continuación se hace una síntesis de algunas de ellas.

En el artículo 26 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos se sientan las bases para la organización del Plan Nacional de Desarrollo (PND) al que se sujetarán los programas de la Administración Pública Federal durante el periodo presidencial. El **Plan Nacional de Desarrollo 2019–2024**, vigente actualmente, en su apartado III [2] Economía, establece como uno de los objetivos, el Rescate del sector energético, el cual dispone que la nueva política energética del Estado mexicano impulsará el desarrollo sostenible mediante la incorporación de poblaciones y comunidades a la producción de energía con fuentes renovables, mismas que serán fundamentales para dotar de electricidad a las pequeñas comunidades aisladas que aún carecen de ella, la transición energética dará pie para impulsar el surgimiento de un sector social en ese ramo, así como para alentar la reindustrialización del país.

La **Ley de Transición Energética**, en su artículo 14, fracciones VII y XVI faculta a la SENER, entre otros, para incorporar la instalación de centrales eléctricas con energías limpias en la planeación indicativa del crecimiento de la infraestructura eléctrica; así como promover la construcción de las obras de infraestructura eléctrica que faciliten la interconexión de energías limpias al Sistema Eléctrico Nacional [3]. Incentivada por dicha Ley, la **Prospectiva de Energías Renovables 2017-2031** establece como la meta de generación de electricidad a partir de fuentes limpias en 35% para el 2024, 37.7% para el 2030 y del 50% para el 2050 [4].

La **Ley General de Cambio Climático**, en su artículo 7, fracción XXIII, establece como atribución de la federación desarrollar programas y proyectos integrales de mitigación y adaptación al cambio climático en materia de energía eléctrica, para lograr el uso eficiente y sustentable de los recursos energéticos fósiles y renovables del país [5].

La **Ley de la Industria Eléctrica**, en su artículo 13, establece las pautas para que la Secretaría de Energía realice el desarrollo de los programas indicativos para la instalación y retiro de las centrales eléctricas, teniendo como uno de los objetivos lograr las metas nacionales de participación de energías limpias en la generación de electricidad [6].

El artículo 33 de **La Ley Orgánica de la Administración Pública Federal** establece como uno de los atributos de la Secretaría de Energía el llevar a cabo la planeación energética a mediano y largo plazos, así como fijar las directrices económicas y sociales para el sector energético nacional. Así mismo, establece que la planeación energética deberá atender, entre otros criterios, la reducción progresiva de impactos ambientales de la producción y consumo de

energía, la mayor participación de las ER en el balance energético nacional y la satisfacción de las necesidades energéticas básicas de la población [7].

A nivel internacional, México se ha comprometido con los **Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) o Agenda 2030**. Los avances y aportaciones del país en temas de ER contribuyen a lograr el objetivo 7 de los ODS, referente a “Energía asequible y no contaminante” [8]. Así mismo, en concordancia con lo expuesto por México en la **Cumbre Climática COP 27**, en 2022 la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, publicó la actualización de la **Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC)** donde al componente de mitigación, México se ha comprometido a reducir su meta de Gases de Efecto Invernadero de 22% a 35% en 2030, con respecto a su línea base. Esto, posiblemente fomentará un incremento en la participación de ER en la generación de energía [9], [10]. A pesar de ello, es necesario continuar incentivando marcos de políticas públicas nacionales que faciliten y permitan unir esfuerzos trasnacionales en pro de una transición energética justa e inclusiva que fortalezca el flujo de financiamiento y atraiga inversores, capacidad y tecnologías [11].

Por otro lado, dentro de este marco estratégico se han desarrollado una serie de iniciativas de carácter estratégico, al objeto de identificar los retos y las oportunidades que se plantean en los distintos ámbitos sectoriales y tecnológicos, como es el **mapa de ruta tecnológica específica en energías del océano en México** [12], [13]. Sin embargo, actualmente se encuentra desactualizada y los compromisos propuestos, en materia de hitos y capacidad instalada contribuida a la matriz energética del país no han sido cumplidos en su totalidad. Además, existen hojas de ruta de renovables: Se incluye la “**Estrategia Nacional de Transición Energética y Aprovechamiento Sustentable de la Energía**” [14], que promueve la utilización, el desarrollo y la inversión de las ER y la eficiencia energética; los “**Mapas de Ruta Tecnológica de Energías Renovables**” [15] y “**Reporte de Inteligencia Tecnológica. Energía del Océano**” [16], que contextualizan e identifican los retos y las barreras que enfrenta el México para el aprovechamiento sustentable de las ER al 2030; la “**Ruta de Eficiencia Energética**” [17], que identifica los actores relevantes, tiempos y la naturaleza de los recursos requeridos para desarrollar las acciones de eficiencia energética establecidas en la estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios; El “**Balance Nacional de Energía 2022**” [18], de la SENER que proporciona información a nivel nacional e internacional para el análisis del desempeño del sector energético primario y secundario; y el “**Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024**” [2], que entre sus ejes transversales atiende el desarrollo económico sostenible de la nación.

Con una superficie de 1,108,766 km², equivalente al 56.36% de la superficie nacional, México se perfila como uno de los países con mayor oportunidad de beneficiarse del aprovechamiento de ERM [19]. Se han identificado zonas potenciales para la instalación de parques ERM, pero por cuestiones políticas, ambientales, sociales, costos y tecnología todavía no han sido despegados. Si bien, el **Mapa de Ruta Tecnológica en Energía del Océano** [12] proyecta para el 2030 disponer con al menos 500 MW de capacidad instalada acumulada para producir electricidad a partir de ERM, la estrategia aún se encuentra en un período incipiente y con una nula implementación de proyectos a escala demostrativa o comercial.

Sin embargo, existen iniciativas propuestas para reformar diversas disposiciones de las leyes de Transición Energética y de la Industria Eléctrica para impulsar la energía eólica marina en México. El estudio denominado “Desarrollo Eólico Marítimo México-2020”, apunta a que México cuenta con un potencial de capacidad instalada de generación eólica marítima superior a los 3,000 GW, de los cuales son explotables 400 GW a corto plazo [20].

En lo relativo a la cadena de valor, México no cuenta con una reglamentación o documentación cuyo objetivo sea potenciar la cadena de valor de las ERM. Sin embargo, el país cuenta con experiencia y conocimiento derivada de la cadena de suministro de la eólica terrestre, que puede ser extrapolado tanto a la eólica marina como a las energías oceánicas. En este sentido el país cuenta con fuertes capacidades industriales en el sector de la construcción naval, petrolera e industrias auxiliares. Hasta la fecha, la experiencia ganada en la cadena de valor de las renovables marinas mexicana ha sido gracias a la participación en proyectos nacionales de I+D+i que se han probado en los bancos de ensayo de instituciones mexicanas o en participaciones de proyectos bilaterales internacionales bilateral, pero no a la construcción de parques comerciales en aguas nacionales. Por tanto, el desarrollo de la cadena de valor depende en gran parte de la presencia de proyectos comerciales, que hará que muchas empresas aprovechen su experiencia en sectores de construcción naval, petrolero, eólica terrestre, etc.; aprovechando, a su vez, a diversificar en otras áreas afines.

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con las energías del mar

En México no existe un documento único u oficial que recopile información actualizada sobre el estado de las ERM en México. Si bien el Mapa de Ruta Tecnológica en Energía del Océano [12], recompila en un solo documento los diferentes recursos ERM, dicho documento se realizó previamente al desarrollo del CEMIE-Océano, que fue clave para investigar en detalle los recursos marinos en alta resolución, identificando zonas potenciales y capacidades para el despliegue de tecnologías para explotación de los recursos marinos. En el **“repositorio de publicaciones”**, realizadas en el marco de las actividades del **CEMIE-Océano**, se pueden encontrar artículos (www.cemieoceano.mx/articulos.php) y libros (www.cemieoceano.mx/libros/libros.php) al respecto [21].

Se incluye en el repositorio REMAR el artículo de Hernandez-Fontes et al. [19], el cual es el trabajo que incluye una perspectiva más holística de los recursos ERM en México. En él, se exponen las zonas potenciales con mayor disponibilidad de las diferentes ERM a escala regional en México.

Las figuras 1, 2 y 3 presentan mapas donde se detalla el recurso tanto undimotriz (oleaje), como de corrientes oceánicas, como de gradiente térmico (OTEC) en las costas de México.

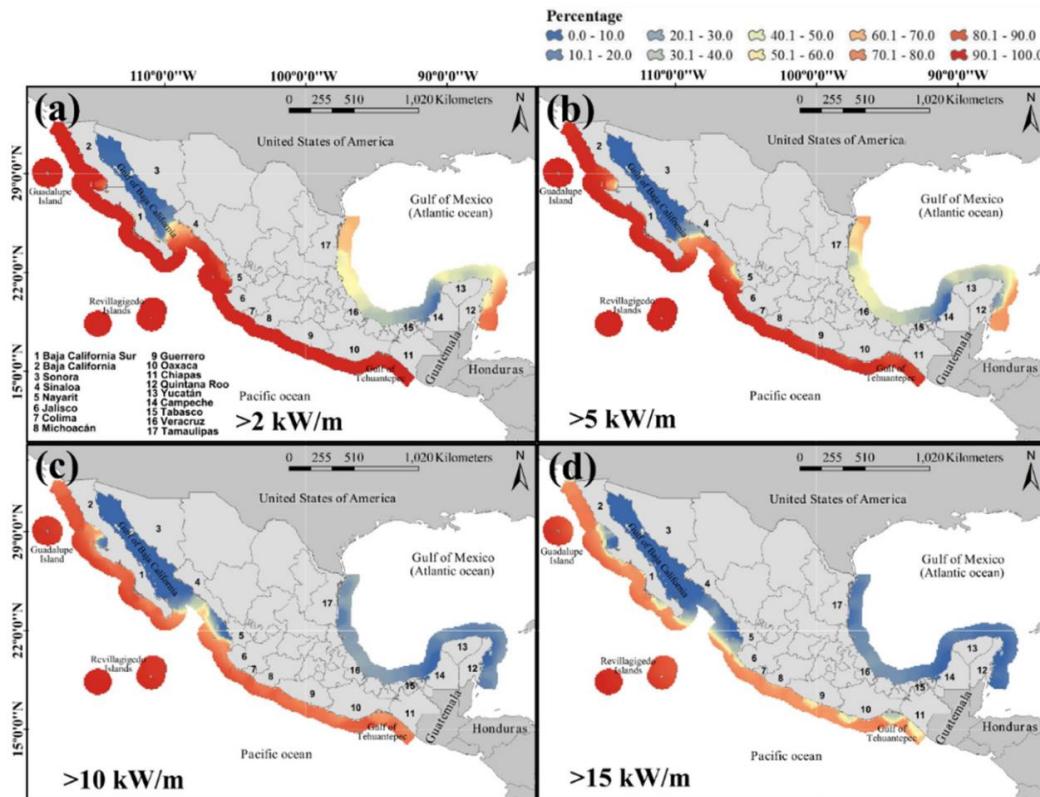


Figura 1. Potencial recurso undimotriz en México por zonas. Fuente [19].

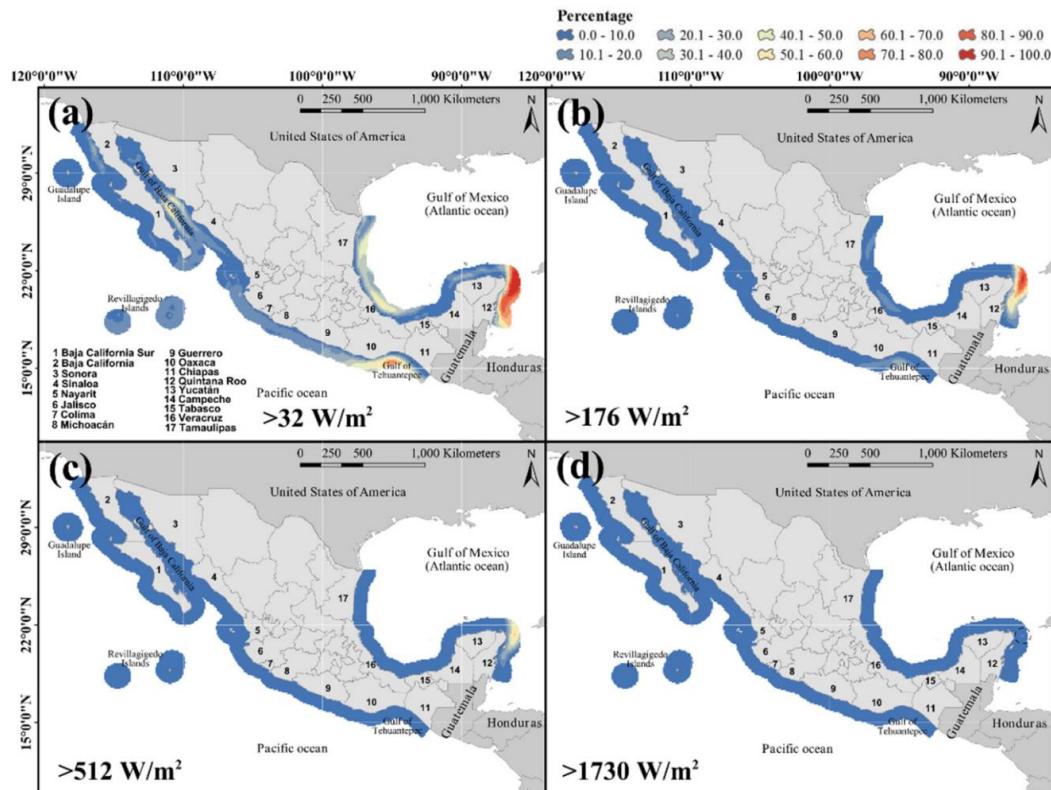


Figura 2. Potencial recurso de corrientes oceánicas en México por zonas. Fuente [19].

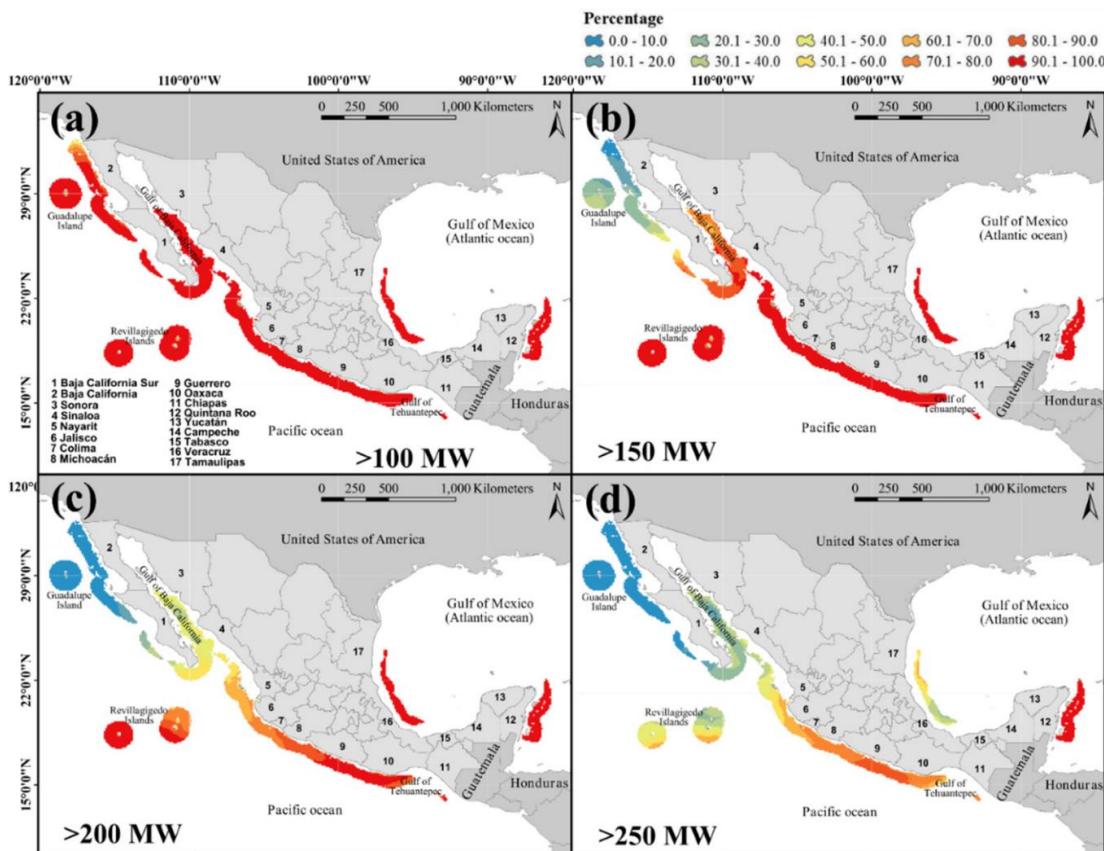


Figura 3. Potencial recurso de gradiente térmico en México por zonas. Fuente [19].

Por otro lado, México cuenta con un consolidado entramado empresarial asociado al sector petrolero y logístico portuario, para la explotación de hidrocarburos, la utilización y reconversión de las infraestructuras portuarias tanto para la fabricación como el montaje de componentes, así como las labores de mantenimiento para el futuro despliegue de parques de las tecnologías de energías del mar. Existen algunas otras empresas mexicanas que han incursionado con diferentes grados de éxito en el desarrollo de ER o en la implementación de plantas piloto ERM. Es de destacar la empresa **Potencia Industrial** que se dedica al diseño y construcción de generadores eoloeléctricos, hidroeléctricos e hidrocinéticos marinos [22]. Entre éstas podemos mencionar a **Energy Forever** y **Exclusive Hightech** [23] que desarrollaron un prototipo para la implementación de una planta piloto undimotriz en Ensenada, Baja California, que desafortunadamente no llegó a implementarse y a la empresa **Eco Wave Power Mexico**, filial de **Eco Wave Power Ltd.**, que tiene un proyecto de instalación de una planta undimotriz de 4.8MW en Manzanillo, Colima, que actualmente se encuentra suspendido [24]. Por otro lado, México cuenta con un entramado industrial sólido relacionado con el desarrollo de infraestructura marítima, principalmente asociado a la industria petrolera y de transporte marítimo. Algunas empresas mexicanas del sector son:

Grupo TMM.– Realiza reparación, conversión y construcción marítima, servicios portuarios y cuenta con una flota de embarcaciones para diferentes propósitos [25].

COTEMAR.- Proporciona servicios a la industria del petróleo y el gas costa afuera y participa en la construcción y mantenimiento de plataformas marinas [26].

Grupo CICE – Realiza operaciones portuarias y desarrollo de infraestructura marítima [27]. **Fugro México.**- Realiza el diseño e inspección de tubería y cableado submarino, la inspección y mantenimiento de infraestructura marítima, levantamientos geofísicos y monitoreo meteoceánico [28].

México cuenta con laboratorios donde se pueden realizar ensayos de prototipos. Algunos ejemplos de estas instalaciones son: el **tanque de oleaje bidimensional de la Universidad de Campeche**, los **tanques de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM en Ciudad de México y en Sisal**, Yucatán, el **canal de ensayo de oleaje de la Universidad de Colima** y el **túnel de viento de la UNAM** [21]. Si bien el país ha destacado en el contexto latinoamericano como uno de los países líderes en avances I+D+i de la región, actualmente en México no hay instalaciones para la realización de ensayos de dispositivos ERM en el ambiente marino conectados a la red eléctrica. Sin embargo, como parte de las actividades del CEMIE-Océano, se ha realizado un gran esfuerzo para monitorear y caracterizar una zona dentro de la Bahía Todos Santos, Baja California, con la finalidad de establecer un laboratorio natural que, en el largo plazo, incluya una conexión a la red eléctrica que permita realizar ensayos de convertidores de ERM.

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de nuevas energías renovables

En relación al código de la red eléctrica de México, no existe una actualización que incluya la integración de ERM en el sistema eléctrico de potencia. Sin embargo, sí se consideran e incluyen a las ER y se describe de la siguiente manera:

El **Mercado Eléctrico en México (MEM)** se rige por tres actores principales: (1) la **Secretaría de Energía (SENER)**, que se encarga de garantizar el suministro de energía al país y dicta las políticas energéticas, como por ejemplo la Ley de la Industria Eléctrica (LIE); (2) la **Comisión Reguladoras de Energía (CRE)** que se encarga de las bases del MEM y otorga permisos para generar energía, donde se establece el derecho de recibir Certificados de Energías Limpias (CEL), y (3) el **Centro Nacional de Control de Energía (CENACE)**, que opera el **Sistema Eléctrico Nacional (SEN)** en los procesos de distribución y transmisión [29]–[31].

En general el SEN, se ha desarrollado gracias a la **Comisión Federal de Electricidad (CFE)**, pero cuyos operativo lo ejerce el CENACE en conjunto con SENER. El SEN se conforma de 197 centrales generadoras y se compone por cuatro sistemas eléctricos aislados: (1) Sistema Interconectado Nacional (SIN) que contribuye a la gran red eléctrica nacional, (2) el Sistema Eléctrico de Baja California, (3) el Sistema Eléctrico Baja California Sur y (4) el Sistema Eléctrico Mulegé.

Desde el 2016, el SEN cambió de estructura donde se permite la acción de generadores privados en el MEM, el cual es operado por el CENACE y se establece la compraventa de CELs. Si

se desea generar arriba de 0.5 MW, se deberá expedir un permiso ante la CRE donde se establecen los derechos a recibir CELs; en caso contrario (menor a 0.5 MW) se deberá llevar a cabo la generación distribuida, por medio de un generador externo que es un propietario de una o varias Centrales Eléctricas, que no requieren ni cuentan con permisos para generar energía [32]. Los procesos de transmisión y generación de energía eléctrica están a cargo única y exclusivamente de la CFE. Los usuarios calificados son aquellos que están registrados ante la CRE y que pueden adquirir suministro eléctrico ya sea como participante del MEM o por medio de suministradores calificados (privados o CFE). La comercialización de la energía eléctrica es libre de competencia, por lo que pueden participar las entidades federativas, municipios y particulares, lo que representa un área de oportunidad para fomentar el despliegue de plantas convertidores de MRE en el país, donde se participe en la transición y distribución por medio de contratos.

En relación a los requerimientos técnicos mínimos para el desarrollo eficiente de los procesos de: Planeación; Control Operativo y Físico; Acceso y Uso de la Infraestructura, el nuevo Código de Red no solo brinda estabilidad a las redes eléctricas, sino que también amplía las oportunidades para una mayor utilización de las ER [33].

En México cada año la Secretaría de Energía (SENER) publica el **Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional** (PRODESEN). Este documento contiene un diagnóstico del estado actual de la red eléctrica y detalla la planeación del Sistema Eléctrico Nacional con un horizonte a quince años. Este documento, además, incluye los elementos relevantes de otros instrumentos de planeación como el Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas y los programas de ampliación y modernización de la Red Nacional de Transmisión y de las Redes Generales de Distribución. A la fecha, el documento más reciente es el **PRODESEN 2024-2038** [34], publicado en junio de 2024, que contiene un análisis detallado del funcionamiento de la red eléctrica en 2023 y el plan de desarrollo a 2038.

4. Documentación relativa a energías del mar en México

México		
Num	Nombre del documento	Contenido del documento
1	SENER-2017- Mapa_de_ruta_Tecnologica_en_E nergia_del_Oceano	Mapa de Ruta Tecnológica en Energía del Océano. Documento que identifica las acciones por realizar para alcanzar las metas y objetivos establecidos, así como los retos y las barreras que enfrenta México para el aprovechamiento sostenible de las energías renovables marinas al 2030.
2	SENER-2017- Mapa_de_ruta_Tecnologica_en_E nergia_del_Oceano_Generacion_d e_Electricidad	Anexo al Mapa de Ruta Tecnológico en Energía del Océano de México que especifica la generación de electricidad al 2030 proyectada, a través de proyectos demostrativos con una capacidad instalada de 500 a 1000 MW.

3	SENER-2024-PRODESEN_2023-2037	PRODESEN. Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024-2037. Documento que detalla los principales objetivos de la política energética y la planificación del Sistema Eléctrico Nacional del Gobierno de México para los próximos quince años. (Anexo 3, páginas 201-211).
4	DOF-2015- Ley_de_Transición_Energética.	Ley de Transición Energética en México. Regulaciones para el aprovechamiento sostenible de la energía, así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica. (Artículo 3, fracción y XVI-d, páginas 26).
5	SENER_IMP-2017- Reporte_de_Inteligencia_Tecnologica_Energia_del_Oceano	Reporte que establece un panorama general del desarrollo de la tecnología empleada para el aprovechamiento de la energía del océano, así como de sus principales retos tecnológicos en México.
6	DOF-2014- Ley_general_de_cambio_climatico	Ley que establece el marco normativo para enfrentar los efectos adversos del cambio climático en México. (Artículo 7, Fracción XXIII, páginas 6).
7	DOF-2014- Ley_de_la_Industria_Eléctrica	Ley que promueve el desarrollo sustentable de la industria eléctrica y garantizar su operación continua, eficiente y segura en beneficio de los usuarios, así como el cumplimiento de las obligaciones de servicio público y universal, de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes. (Artículo 13. (Página 17). Capítulo III (Páginas 81-83)).
8	DOF-1976- Ley_Orgánica_de_la_Administración_Pública_Federal	Ley que establece las bases de organización de la Administración Pública Federal, centralizada y paraestatal de México. (Artículo 33, páginas 31-34).
9	UNFCCC- 2022.Contribución_Determinada_a_Nivel_Nacional	Documento alineado con la Ley General de Cambio Climático que establece un aumento de ambición con nuevos compromisos de mitigación de gases de efecto invernadero y compromisos de adaptación al cambio climático en México. (Componente de mitigación- Generación eléctrica, páginas 12-13).
10	Gorr-Pozzi_et al-2022- Deployment_of_sustainable_off_grid_marine_renewable_energy_systems_in_Mexico	Trabajo que pretende fomentar el despliegue de tecnologías renovables marinas en zonas costeras de México, a través de la evaluación de criterios de sostenibilidad con un enfoque interdisciplinario que identifica los principales

		componentes técnicos, ambientales, sociales y económicos.
11	SENER-2015- Estrategia_Nacional_de_Transición _Energética_Aprovechamiento_Sus tentable_de_la_Energía	El mapa conceptual que contempla los elementos de integración y temas estratégicos que forman parte de la Estrategia Nacional de Energía (ENE) 2013-2027 de México.
12	SENER-2018-Mapas de Ruta Tecnológica de Energías Renovables	Repositorio que identificar los retos y las barreras que enfrenta México para el aprovechamiento sustentable de las energías renovables al 2030.
13	CNUEE-2017- Hoja_de_Ruta_en_Materia_de_Efic iencia_Energética	Documento que identifica los actores relevantes, tiempos y la naturaleza de los recursos requeridos para desarrollar las acciones de eficiencias energéticas establecidas en la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles Más Limpios en México.
14	Hernandez_et al-2020	Trabajo que examina los factores socioeconómicos y ambientales que pueden afectar la introducción de la recolección de energía oceánica en áreas actualmente sin electricidad de México.
15	FORBES-2023- Energía_eólica_marina_para_cuan do_en_México	Documento de divulgación que expone la capacidad instalada explotable a corto plazo y los puntos principales por los cual aún no hay un camino cierto para el despliegue comercial offshore wind en México (Página 2).
16	CEMIE-Oceano-2017- official_website	Página oficial del Centro Mexicano en Innovación de Energía Océano. (Sección Publicaciones, Artículos y boletines).
17	Potencia_Industrial- Official_website	Empresa dedicada al diseño y construcción de generadores eoloeléctricos, hidroeléctricos e hidrocinéticos marinos en México.
18	CICESE-2017- Conocimiento_tecnología_de_punt a_el_oleaje_como_fuente_de_ene rgía	Documento divulgativo que exponen algunas de las empresas privadas han intervenido para la implementación de plantas piloto ERM en México.
19	Tethys-2019- Eco_Wave_Power_Manzanillo_I_Pro ject	El proyecto Eco Wave Manzanillo previsto como la primera central eléctrica de energía undimotriz comercial conectada a la red en México y América Latina.
20	Grupo_TTM-2024- Transportes_logística- Official_website	Empresa mexicana que brinda soluciones de transporte marítimo y logística integral de forma eficaz, segura y rentable a los clientes del sector energético, marítimo y portuario.

21	COTEMAR_2024-Official_webseite	Empresa mexicana de servicios para la industria energética, de relevancia nacional y proyección internacional, con más de 44 años de experiencia en el mercado.
22	Grupo_CICE-2024-Official_webseite	Empresa mexicana de manejo y almacenamiento de toda clase de mercancías para importación, exportación y distribución nacional con paquetes integrales, adaptándonos a las necesidades de cada uno de nuestros clientes.
23	Fugro-2024-Official_webseite	Empresa que en México se expandió a operaciones marinas para prestar servicios a clientes involucrados en la producción de petróleo, gas en alta mar y offshore wind.
24	CENACE-2018-Sabes_que_es_el_Mercado_Eléctrico_Mayorista	El Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) provee energía a precios competitivos para que todos los usuarios pudieran beneficiarse adquiriendo energía a precios más accesibles en México.
25	Vega_de_la_Mora_etal-2019-Redes_Eléctricas_Mercado_Mayorista_de_Electricidad_en_México	Libro del CEMIE-Océano que describe la historia y funcionamiento del Mercado Eléctrico Mayorista en México. (Sección Mercado Eléctrico Mayorista, Páginas 39-76).
26	CENACE-2024-Official_webseite	Organismo público descentralizado cuyo objeto es ejercer el control operativo del Sistema Eléctrico Nacional (SEN); la operación del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) en México
27	DOF-2008-Ley_de_la_Comisión_Reguladora_de_Energía	Decreto mexicano que promueve el desarrollo eficiente del suministro y venta de energía eléctrica a los usuarios del servicio público; la generación, exportación e importación de energía eléctrica, que realicen los particulares; y la adquisición de energía eléctrica que se destine al servicio público.
28	DOF-2016-Comisión_Reguladora_de_Energía	Decreto de Código de Red que exime los requerimientos técnicos mínimos en México para el desarrollo eficiente de los procesos de planeación, medición, Control Operativo, Control Físico, acceso y uso de la infraestructura eléctrica.
29	UN-2016-Report_of_the_Conference_of_the_Parties_on_its_21st_session	Convención Marco sobre el Cambio Climático en el cual las Naciones se linean y acuerdan objetivos y contribuciones hacia la descarbonización global.
30	Rivera_etal-2024-Identification_of_applicable_regulation_and_public_policy_gaps_regarding_marine_renewable_energy_in_Mexico	Artículo científico que revisa la legislación mexicana actual, nichos de oportunidad y vías legales para fines de planeación y operación en el área de Energías Renovables Marinas.
31	DOF-2019-Plan_Nacional_de_Desarrollo	Documento en el que el Gobierno de México explica cuáles son sus objetivos prioritarios

		durante el sexenio (2019-2024). (Apartado 3, Rescate del sector energético, Páginas 59-60).
32	CONACyT-2020- Programa_Nacional_Estrategico_so bre_Transicion_Energetica	Documento que busca generar información con base científica, promover una reflexión amplia e identificar acciones específicas para alcanzar un sistema energético sostenible y equitativo en México
33	SENER-2023- Balance_Nacional_de_Energía_202 2	Expone en forma general y desagregada los principales indicadores de producción, comercio y consumo de la energía de México y sus comparativos en el contexto internacional.
34	SENER-2017- Prospectiva_de_Energías_Renovabl es_2017–2030	Instrumento de política energética que contiene información histórica y prospectiva las energías renovables consideradas en la Ley de la Industria Eléctrica (LIE), así como estudios y tendencias de las energías renovables en México, que permite fomentar un mayor uso en la toma de decisiones estratégicas de inversión, investigación o política pública.
35	CUESTIONARIO PARA LOS INFORMES DE ENERGÍAS DEL MAR- México_vf	Documento entregable correspondiente a la etapa final de CYTED-REMAR de México.

5. Conclusiones finales y recomendaciones

A lo largo de los puntos analizados en éste capítulo, se puede inferir que México está avanzando hacia una transición energética inclusiva con las energías renovables marinas (ERM). Si bien históricamente México ha sido un país con una dependencia económica basada principalmente en la comercialización de fuentes fósiles, el contexto de cambio climático a escala global le ha exigido tomar riendas para descarbonizar su economía. Por ello, se ha comprometido con acuerdos internacionales para generar una transición energética basada en el uso sostenible de energías renovables (ER) a mediano y largo plazo. El marco normativo de ER se encuentra en evolución con ambiciosos objetivos que fomentan la sostenibilidad y la innovación en el sector. Sin embargo, el país no cuenta con una sólida reglamentación específica para ERM. A pesar de ello, el gobierno y grupos académicos han sumado esfuerzos en la elaboración de Mapas de Rutas y Centros de Innovación en energía oceánica (CEMIE-Océano) para su futuro despliegue comercial. Entre las principales leyes y planes de acción que regulan las ER en México destacan:

El **Plan Nacional de Desarrollo 2019–2024**, que establece como uno de los objetivos impulsar el desarrollo sostenible mediante la incorporación de poblaciones y comunidades a la producción de energía con fuentes renovables, mismas que serán fundamentales para dotar de electricidad a las pequeñas comunidades aisladas mexicanas que aún carecen de ella.

La **Ley de Transición Energética**, promueve en México la incorporación e instalación de centrales eléctricas con energías limpias en la planeación indicativa del crecimiento de la infraestructura eléctrica; así como la construcción de las obras de infraestructura eléctrica que faciliten la interconexión de energías limpias al Sistema Eléctrico Nacional.

La **Prospectiva de Energías Renovables 2017-2031** establece como la meta de generación de electricidad a partir de fuentes limpias en 35% para el 2024, 37.7% para el 2030 y del 50% para el 2050 en México.

La **Ley General de Cambio Climático**, impulsa el desarrollo de programas y proyectos integrales de mitigación y adaptación al cambio climático en materia de energía eléctrica, para lograr el uso eficiente y sustentable de los recursos energéticos renovables en México.

La **Ley de la Industria Eléctrica**, incluye las pautas para que la Secretaría de Energía realice el desarrollo de los programas indicativos para la instalación y retiro de las centrales eléctricas, teniendo como uno de los objetivos lograr las metas nacionales de participación de energías limpias en la generación de electricidad.

La **Ley Orgánica de la Administración Pública Federal** atribuye a la Secretaría de Energía la planeación energética para reducir progresivamente los impactos ambientales por la producción y consumo de energía, con una mayor participación de las ER en el balance energético nacional.

El **mapa de ruta tecnológica específica en energías del océano en México** incluye objetivos e iniciativas de carácter estratégico que identifican los retos y las oportunidades que enfrenta el México para el aprovechamiento sustentable de las ERM al 2030.

La **Ruta de Eficiencia Energética** identifica los actores relevantes, tiempos y la naturaleza de los recursos requeridos para desarrollar las acciones de eficiencia energética establecidas en la estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios.

El **“Balance Nacional de Energía 2022**, emitido por la Secretaría de Energía para proporcionar información a nivel nacional e internacional que analiza el desempeño del sector energético primario y secundario.

El **Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024** atiende, entre sus ejes transversales, el desarrollo económico sostenible de la nación.

En resumen, México es un país en Iberoamérica que destaca en materia de avance I+D+i de ERM y está estratégicamente posicionado para liderar el desarrollo del sector en América Latina. El cumplimiento de los compromisos y regulaciones va a ser crucial para alcanzar los objetivos de participación de las ER en la matriz energética y sostenibilidad a mediano y largo plazo.

México cuenta con dos océanos que, gracias a sus diferencias características, le permiten contar con todo el espectro de ERM con suficiente disponibilidad espacial y temporales. De ser aprovechadas, sus potenciales podrían contribuir significativamente en electrificar zonas costeras aisladas y diversificar sosteniblemente la matriz energética de México.

México dispone de un consolidado entramado empresarial asociado al sector petrolero, marítimo portuario, construcción naval, logística, infraestructura marítima y fabricación de partes y componentes para la energía eólica terrestre, entre otros. Si bien han existido iniciativas para comenzar el despliegue del sector MRE, todas han sido a partir de consorcios extranjeros ya que existen pocas industrias dentro del ámbito del desarrollo de tecnología relacionada con ERM. Sin embargo, posee una ardua experiencia y reconocimiento en la explotación de hidrocarburos, la utilización y reconversión de las infraestructuras portuarias tanto para la fabricación como el montaje de componentes, así como las labores de mantenimiento que podrían extrapolarse en un futuro próximo y adaptarse a los requerimientos para el despliegue de parques de tecnologías ERM.

Como recomendaciones generales para fortalecer el desarrollo de las energías oceánicas en México se propone:

1. **Incentivar la sostenibilidad energética** mediante medidas que promuevan el aprovechamiento de recursos renovables, partiendo de la descarbonización gradual de los procesos de generación fósiles a lo largo de todo su ciclo de vida, asegurando también la compatibilidad y la coexistencia con las distintas actividades marino-marítimas que se desarrolle en la zona.
2. **Mejorar el suministro eléctrico** a través del mantenimiento y actualización de infraestructura de interconexión eléctrica moderna y eficiente que garanticen la operación de instalaciones renovables marinas.
3. **Incentivar la inversión y financiación** a través del incentivo de nuevos programas que se adapten a las necesidades actuales pero que incluyan conocimiento y personal capacitado de proyectos afines pasados. Creación de programas de incentivos fiscales y subvenciones específicas para proyectos de energías renovables marinas, facilitando el acceso a financiación tanto pública como privada.
4. **Gestionar de manera estricta un Mapa de Ruta** de energías renovables marinas realista que atienda todos los hitos y aprendizajes adquiridos en las versiones pasadas.
5. **Impulsar una gestión de planificación espacial marina** en paralelo a los mapas de ruta de energías marinas actualizados.
6. **Fomentar la concesión de zonas costeras y marinas destinadas a la instalación experimental de laboratorios naturales** en el medio marino para la realización de ensayos de dispositivos e implementación de plantas piloto de ERM con capacidad para interconectarse a la red eléctrica. Lograr resultados exitosos que comprueben el buen rendimiento de dispositivos de aprovechamiento MRE es fundamental para continuar ganando experiencia, avanzar en I+D+i, mejorar las capacidades técnicas y operativas y disminuir los costos de generación eléctrica, lo que conllevará a una mayor credibilidad de los tomadores de decisiones para su apuesta y financiación.

7. **Incentivar la I+D+i** mediante el apoyando la investigación, desarrollo e innovación a en centros de investigación líderes en áreas afines, canales y bancos de ensayo, promoviendo la colaboración entre los distintos agentes como universidades, centros de investigación y la industria a nivel nacional y transferencia internacional.
8. **Fomentar la electrificación** y el desarrollo de infraestructura y logística en zonas aisladas no interconectadas a la red eléctrica.
9. **Considerar la vasta disponibilidad y diversidad de recursos renovables marinos** como un servicio ecosistema a lo largo de las costas de México. Si bien la ERM son tecnologías incipientes que enfrentan diversos grados de desarrollo, existen sectores privados interesados en el despliegue comercial en México. Para ello es necesario generar consorcios donde el gobierno apoye y facilite el financiamiento.
10. **Aprovechar infraestructura fuera de costa** de centrales petroleras para acoplar el despliegue de las primeras centrales de energía eólica marina, principalmente en el Golfo de México. Esto será un hito clave en el inicio de la transición de las ERM en México que dará pie a una mayor confiabilidad, como precursor para el despliegue del resto de las tecnologías renovables marinas.
11. **Diversificar los esquemas de generación eléctrica** en función a la madurez tecnológica y costos nivelados de diferentes ER, que faciliten su inserción, aumento de capacidad instalada y competitividad en el Merca Eléctrico Nacional.
12. **Incentivar la cadena de valor industrial** mediante el apoyo a la industria nacional petrolera, naval, portuaria y eólica terrestre con incentivos para adaptar sus capacidades en la participación en proyectos de energías marinas.
13. **Impulsar programas de información, educación ambiental y divulgación** masivos para concientizar a la población sobre el cambio climático, los beneficios directos e indirectos que conlleva tomar acciones mitigadoras climáticas urgentes. A su vez, como se ha mencionado en puntos anteriores, la destinación de zonas de usos exclusivos para la instalación de plantas piloto y ensayos en el mar podría generar beneficios indirectos, como el incremento en el valor de pertenencia y apropiación de nuevas tecnologías sostenibles en la cultura y la sociedad. De ésta manera, también podría esperarse un mayor apoyo y aceptación social en el uso de nuevas tecnologías energéticas marinas.

Referencias

- [1] Rivera, G., Ortiz, M., Rivera-Arriaga, E., & Mendoza, E. (2024). Identification of applicable regulation and public policy gaps regarding marine renewable energy in Mexico. *Ocean Coast. Manag.*, 254, 107171. <https://doi.org/10.1016/j.occecoaman.2024.107171>.
- [2] DOF. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019–2024*: Diario Oficial de la Federación. Available online: <https://www.dof.gob.mx> (accessed on 04 June 2024).
- [3] DOF. (2015). *Ley de Transición Energética*. México: Diario Oficial de la Federación. Available online: <https://www.dof.gob.mx> (accessed on 05 June 2024).
- [4] SENER. (2017). Prospectiva de Energías Renovables 2017–2031. Retrieved from: Secretaría de Energía de México <https://www.gob.mx/sener/artículos/prodesen-2020-2034> (accessed on 05 June 2024).
- [5] DOF. (2014). *Ley General de Cambio Climático*: Diario Oficial de la Federación. Available online: <https://www.dof.gob.mx> (accessed on 06 June 2024).
- [6] DOF. (2014). *Ley de la Industria Eléctrica*: Diario Oficial de la Federación. Available online: <https://www.dof.gob.mx> (accessed on 07 June 2024).
- [7] DOF. (1976). *Ley Orgánica de la Administración Pública Federal*: Diario Oficial de la Federación. Available online: <https://www.dof.gob.mx> (accessed on 07 June 2024).
- [8] UN. (2016). Report of the Conference of the Parties on its 21st session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015: Addendum. Geneva. Retrieved from: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. (Accessed 08 June 2024).
- [9] UNFCCC. (2022). Contribución Determinada a Nivel Nacional. Actualización 2022 - 2030: Gobierno de México. Retrieved from: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/Mexico_NDC_UNFCCC_update2022_FINAL.pdf. (Accessed 09 June 2024).
- [10] CONACyT. (2020). Programa Nacional Estratégico sobre Transición Energética (ProNacEs TE). Retrieved from: https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/convocatorias/fordecyt/fordecyt_2020-05/PRESENTACION_SESION_ACLARACIONES_2020-01-Energia.pdf. (Accessed 12 June 2024).
- [11] Gorr-Pozzi, E., Olmedo-González, J., & Silva, R. (2022). Deployment of sustainable off-grid marine renewable energy systems in Mexico. *Frontiers in Energy Research*, 10, 1047167. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1047167>
- [12] SENER. (2017). Mapa de Ruta Tecnológica en Energía del Océano. Retrieved from: Secretaría de Energía de México https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279712/MRTOCEANO_SENER_V_13112017-2_OPT.pdf (accessed on 10 June 2024).
- [13] SENER. (2017). Mapa de ruta Tecnologica en Enegia del Oceano Generacion de Electricidad. Retrieved from: Secretaría de Energía de México https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279867/ESQUEMA_MRTOCEANO_SENER_VERSION_FINAL_REV2.pdf (accessed on 10 June 2024).

- [14] SENER. (2015). Estrategia Nacional de Transición Energética y Aprovechamiento Sustentable de la Energía. Secretaría de Energía de México. Retrieved from: <https://www.gob.mx/sener/documentos/estrategia-nacional-de-transicion-energetica-y-aprovechamiento-sustentable-de-la-energia> (accessed on 10 June 2024)
- [15] SENER. (2018). Mapas de Ruta Tecnológica de Energías Renovables. Secretaría de Energía. Retrieved from: <https://www.gob.mx/sener/documentos/mapas-de-ruta-tecnologica-de-energias-renovables> (accessed on 10 June 2024).
- [16] SENER-IMP. (2017). Reporte de Inteligencia Tecnológica. Energía del Oceano. Retrieved from: <https://www.gob.mx/sener/documentos/mapas-de-ruta-tecnologica-de-energias-renovables> (accessed on 10 June 2024).
- [17] CNUEE. (2017). Hoja de Ruta en Materia de Eficiencia Energética. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279710/IT_OCEANO_VERSION_311017.pdf (accessed on 11 June 2024).
- [18] Hernández-Fontes, J. V., Felix, A., Mendoza, E., Cueto, Y. R., & Silva, R. (2020). On the marine energy resources of Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), 191. <https://doi.org/10.3390/jmse7060191>
- [19] FORBES. (2023). Energía eólica marina, ¿para cuándo en México?. Forbes México. Retrieved from: <https://www.forbes.com.mx/energia-eolica-marina-para-cuando-en-mexico/>. (Accessed 11 June 2024).
- [20] SENER. (2023). Balance Nacional de Energía 2022. Secretaría de Energía. Retrieved from: <https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnerg%C3%ADa2022.pdf> (accessed on 11 June 2024).
- [21] CEMIE-Océano. (2017). CEMIE-Océano official website. Retrieved from: <https://www.cemieoceano.mx/>. (Accessed 11 June 2024).
- [22] Potencia Industrial. (2024). Retrieved from: <https://www.potenciaindustrial.com.mx/>. (Accessed 12 June 2024).
- [23] CICESE. (2017). *Conocimiento y tecnología de punta: el oleaje como fuente de energía*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Retrieved from: <https://www.cicese.edu.mx/cicese2/difusion/getDatosDifusionId/618>. (Accessed 12 June 2024).
- [24] Tethys. (2019). *Eco Wave Power Manzanillo I Project*. Retrieved from: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/eco-wave-power-manzanillo-i-project>. (Accessed 12 June 2024).
- [25] Grupo TMM. (2024). Retrieved from: <https://www.tmm.com.mx/>. (Accessed 12 June 2024).
- [26] COTEMAR. (2024). Retrieved from: <https://cotemar.com.mx/>. (Accessed 12 June 2024).
- [27] Grupo CICE. (2024). Retrieved from: <https://home.grupocice.com/>. (Accessed 12 June 2024).
- [28] Fugro. (2024). Retrieved from: <https://www.fugro.com/contact/locations/mexico>.

(Accessed 12 June 2024).

- [29] CENACE. (2018). *¿Sabes qué es el Mercado Eléctrico Mayorista?*. Centro Nacional de Control de Energía. Retrieved from: <https://www.gob.mx/cenace/articulos/sabes-que-es-el-mercado-electrico-mayorista?idiom=es>. (Accessed 13 June 2024).
- [30] Vega de la Mora, L. A., Angeles-Camacho, C. & Melchor Quinto, A. Y. (2019). Redes Eléctricas: Mercado Mayorista de Electricidad en México. Estado del Arte.
- [31] CENACE. (2024). Centro Nacional de Control de Energía. Retrieved from: <https://www.gob.mx/cenace>. (Accessed 13 June 2024).
- [32] DOF. (2008). Ley de la Comisión Reguladora de Energía. Diario oficial de la federación. Retrieved from: <https://www.cre.gob.mx/documento/33.pdf>. (Accessed 15 June 2024).
- [33] DOF. (2016). Comisión Reguladora de Energía. ,” 2016. Diario oficial de la federación. Retrieved from: [https://www.cenace.gob.mx/Docs/16_MARCOREGULATORIO/SENyMEM/\(DOF 2016-04-08 CRE\) RES-151-2016 DACG Código de Red.pdf](https://www.cenace.gob.mx/Docs/16_MARCOREGULATORIO/SENyMEM/(DOF 2016-04-08 CRE) RES-151-2016 DACG Código de Red.pdf). (Accessed 15 June 2024).
- [34] SENER. (2024). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024-2037 Secretaría de Energía. Retrieved from: <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2024-2038>. (Accessed 17 June 2024).

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN PANAMÁ

Arthur McCarty James Rivas (Universidad Tecnológica de Panamá)
José Rodríguez Sánchez (Universidad Tecnológica de Panamá)

1. Políticas energéticas en energías del mar y renovables.

Panamá no tiene una regulación específica para las energías renovables marinas. Sin embargo, el país cuenta con un marco legal que promueve el desarrollo de energías renovables en general, lo cual puede incluir indirectamente a las energías marinas. Se mencionan algunas leyes y resoluciones relevantes:

Ley 45 de 4 de agosto de 2004:

Establece un régimen de incentivos para el fomento de sistemas de generación hidroeléctrica y de otras fuentes nuevas, renovables y limpias.

Ley 37 de 10 de junio de 2013:

Regula el régimen de incentivos para el fomento de la construcción, operación y mantenimiento de centrales y/o instalaciones solares en el territorio de la República de Panamá.

Ley 44 de 25 de abril de 2011:

Establece incentivos para la construcción y explotación de centrales eólicas destinadas a la prestación del servicio público de electricidad.

Resolución No. 5399 de 27 de junio de 2012:

Define el procedimiento para la conexión de centrales particulares de fuentes nuevas, renovables y limpias de hasta 500 kW a las redes de media y baja tensión de las empresas de distribución eléctrica.

Política Energética Nacional

El Plan Energético Nacional 2015-2050 busca consolidar en un solo marco normativo todas las fuentes renovables, proporcionando reglas claras y definitivas para brindar seguridad y confianza a los inversionistas interesados en promover estas fuentes en el país. Estas normativas y leyes establecen incentivos fiscales, procedimientos para la conexión de energías renovables y promueven un marco legal que facilita la integración de tecnologías limpias en la matriz energética de Panamá.

En relación con hojas de ruta, Panamá tampoco no dispone de una hoja de ruta específica para energías renovables marinas. Sin embargo, hay documentos y planes estratégicos que abordan las energías renovables en general, algunos de los cuales incluyen menciones a la energía marina como una parte del enfoque más amplio en la transición energética del país.

Agenda de Transición Energética 2020-2030:

Este documento aborda la transición energética en Panamá, destacando la importancia de diversificar la matriz energética del país. Incluye capítulos sobre el desarrollo de

diferentes tipos de energías renovables, aunque no se detalla específicamente una hoja de ruta para las energías marinas.

Plan Energético Nacional 2015-2050:

Este plan abarca las estrategias de largo plazo para la integración de energías renovables en la matriz energética de Panamá. Aunque no se enfoca exclusivamente en energías marinas, establece un marco general que podría incluir el desarrollo futuro de este tipo de energía.

Política Nacional de Producción Más Limpia (2007):

Establece directrices para la adopción de tecnologías limpias y sostenibles en la producción energética, promoviendo la investigación y el desarrollo de energías renovables.

Plan Estratégico Nacional para el Desarrollo de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación (PENCYT) 2019-2024:

Este plan menciona el impulso a la investigación en energías renovables, incluyendo potencialmente la energía marina como parte de los esfuerzos para innovar en el sector energético.

Aunque Panamá no tiene una hoja de ruta específica para energías renovables marinas, los documentos y planes existentes proporcionan un marco general para la integración de energías renovables en la matriz energética del país, dejando abierta la posibilidad de incluir energías marinas en futuros desarrollos y estrategias.

Plan Energético Nacional 2015-2050

En el Plan Energético Nacional 2015-2050 y otros reportes relacionados con la energía renovable en Panamá, no se menciona específicamente una estimación de MW instalados para energías renovables marinas (como eólica *offshore*, energía de olas, mareomotriz, etc.). Sin embargo, se proporcionan detalles sobre las capacidades planificadas para otras fuentes de energías renovables.

Estimaciones Generales de Energías Renovables:

Energía Eólica: Se proyecta que la capacidad instalada para la energía eólica alcanzará aproximadamente 3705 MW para el año 2050.

En cuanto a Energía Eólica *Offshore* en Panamá, se ha realizado un estudio con la colaboración de *Lahmeyer Internacional*. Sin embargo, señala que se sabe poco sobre el potencial eólico en plataforma marina (*offshore*) y que la Secretaría Nacional de Energía iniciará los estudios necesarios para identificar dicho potencial.

Energía Solar: Se estima una capacidad instalada de aproximadamente 3647.92 MW para energía solar para el año 2050.

Panamá ha desarrollado varios proyectos piloto en el ámbito de la energía solar fotovoltaica, como parte de su agenda de transición energética. Estos proyectos están

orientados a la generación distribuida y al autoconsumo, lo cual puede proporcionar un marco para la integración de nuevas tecnologías renovables, incluidas las marinas en el futuro.

Otras Energías Renovables: Biomasa: 8.2 MW, Hidroeléctrica: 851 MW, Gas Natural: 4112 MW.

Actualmente, no hay una estimación específica de MW instalados ni una fecha definida para la implementación de energías renovables marinas en Panamá según los documentos disponibles. Sin embargo, el país está avanzando en la integración de otras fuentes de energías renovables, y se espera que en el futuro se consideren también las energías marinas como parte de la matriz energética nacional.

Aunque Panamá está en las etapas iniciales del desarrollo de energías marinas, se están tomando diversas medidas para impulsar y potenciar toda la cadena de valor de estas energías:

Política Nacional de Océanos: La política promueve el desarrollo sostenible de los recursos marinos y costeros, lo cual incluye la consideración de energías marinas como parte de una economía azul más amplia. Se menciona la necesidad de realizar evaluaciones de impacto ambiental que incluyan recursos marino-costeros.

Ley 45 de 2004: Proporciona incentivos fiscales y no fiscales para la promoción de energías renovables, que podría incluir energías marinas.

SENACYT: La Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación apoya programas de investigación en energías renovables, incluyendo potencialmente la energía marina.

Colaboraciones Internacionales: Panamá está colaborando con organizaciones internacionales y otros países para compartir conocimientos y tecnologías relacionadas con las energías renovables y marinas.

Alianzas Público-Privadas: Se están fomentando alianzas entre el sector público y privado para desarrollar proyectos de energías renovables, que eventualmente podrían incluir energías marinas.

Expansión de la Red de Transmisión: El Plan Energético Nacional incluye la expansión de la red de transmisión para soportar la integración de nuevas fuentes de energía renovable, incluyendo la potencial energía marina.

En Panamá, existen estudios preliminares y menciones sobre el potencial de recursos marinos, especialmente en relación con la energía eólica *offshore*. Sin embargo, no se dispone de un documento integral que compile estudios detallados sobre todos los tipos de recursos marinos (eólica *offshore*, solar fotovoltaica flotante, oleaje, corrientes de marea, gradientes salinos o térmicos). La mayoría de los planes estratégicos y políticas energéticas abordan el tema de manera general, destacando la necesidad de diversificar la matriz energética y realizar evaluaciones de impacto ambiental para aprovechar estos recursos de manera sostenible.

En cuanto al **entramado industrial** dedicado específicamente a tecnologías marinas Panamá, es incipiente, pero existen varias empresas y entidades involucradas en el desarrollo de energías renovables y tecnologías relacionadas, algunas de las cuales podrían tener potencial para expandirse hacia el ámbito de las energías marinas. A continuación, se destacan algunas empresas y proyectos relevantes:

- **Open Blue Sea Farms:** Empresa dedicada a la acuicultura sostenible, podría potencialmente expandirse hacia proyectos de energía marina en el futuro.
- **Proyectos Piloto de MSPglobal en el Pacífico Sur (SPINCAM):** Estos proyectos apoyan el desarrollo de una economía azul sostenible en Panamá mediante estrategias basadas en los ecosistemas.
- **SENACYT (Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación):** Apoya programas de investigación en ciencia y tecnologías marinas enfocados en el aprovechamiento sostenible de los recursos marino-costeros.
- **Estación Científica Coiba-AIP:** Enfocada en la investigación científica, esta estación puede contribuir al desarrollo de tecnologías y estudios en el ámbito marino.
- **Universidad Tecnológica de Panamá (UTP):** Realiza investigaciones en el campo de las energías renovables y tiene el potencial de liderar proyectos de investigación en tecnologías marinas.
- **Centro de Innovación y Desarrollo Sostenible (CIDES):** Este centro promueve la investigación y el desarrollo en tecnologías sostenibles, incluyendo energías renovables marinas.
- **Panama Canal Authority (ACP):** Realiza estudios sobre impacto ambiental y desarrollo de infraestructuras marítimas que podrían ser aplicables a proyectos de energías marinas.
- **Ocean Infinity:** Empresa internacional con operaciones en Panamá, especializada en servicios de mapeo y exploración marítima, que podría colaborar en proyectos de energías marinas.
- **Los astilleros en Panamá** tienen el potencial de desempeñar un papel importante en el desarrollo de energías marinas, aprovechando su infraestructura y experiencia en el sector marítimo. La colaboración entre estos astilleros, el gobierno y el sector privado podría permitir impulsar proyectos innovadores y sostenibles en el ámbito de las energías marinas. Los astilleros de Panamá cuentan con experiencia en la construcción, mantenimiento y reparación de estructuras marítimas. Se pueden mencionar los siguientes:
 - Astillero de Balboa (Astillero de Panama Ports Company).
 - Astillero MEC Shipyards.
 - Astillero Talleres Industriales.
 - Astillero Braswell Shipyard.
 - División industrial del Canal de Panamá.

Adicionalmente a estos astilleros, existen otros talleres de reparación naval de menor tamaño y servicios de remolcadores y transporte en barcazas que son necesarias en la instalación de infraestructura para la producción de energía marina.

Actualmente, Panamá no cuenta con instalaciones experimentales significativas dedicadas exclusivamente al ensayo o conexión de energías del mar.

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de nuevas energías renovables

La Ley 45 de 2004 establece un régimen de incentivos para el fomento de sistemas de generación hidroeléctrica y otras fuentes renovables y limpias. La Resolución No. 5399 de 2012 establece el procedimiento para la conexión de centrales particulares de fuentes nuevas, renovables y limpias de hasta 500 kW a las redes de media y baja tensión de las empresas de distribución eléctrica.

Agenda de Transición Energética 2020-2030:

Esta agenda se enfoca en la flexibilidad y almacenamiento en el Sistema Interconectado Nacional (SIN), la inteligencia en las redes de transmisión y distribución, y la calidad de la energía. La integración de fuentes de energía renovables es una de las prioridades y se están desarrollando los instrumentos necesarios para implementar esta hoja de ruta.

Plan Energético Nacional 2015-2050:

Este plan incluye la actualización de licitaciones y mecanismos de compra de energía para promover la competitividad entre diferentes tecnologías renovables. También se menciona la necesidad de consolidar las legislaciones existentes bajo una normativa única para armonizar la integración de fuentes renovables en la red eléctrica.

Normas y Procedimientos Técnicos:

Procedimiento para la Conexión de Energías Renovables: Establece los criterios técnicos para la conexión de plantas de generación eléctrica renovable de hasta 500 kW a las redes de distribución.

Reglamento de Transmisión: Detalla los procedimientos para la conexión y operación de generadores renovables en el sistema de transmisión.

Plan Indicativo de Generación 2022-2036:

Este documento proporciona un marco para la planificación y expansión de la capacidad de generación en Panamá, incluyendo la integración de fuentes renovables. Se proyecta una expansión significativa de la capacidad instalada de energía solar y eólica, con planes detallados para su implementación.

Panamá ha realizado varias actualizaciones en sus códigos y regulaciones para facilitar la integración de energías renovables en la red eléctrica. Las leyes y resoluciones actuales proporcionan un marco para la conexión de plantas de generación renovable y promueven la competitividad entre diferentes tecnologías.

La infraestructura de su red eléctrica actual incluye una combinación de generación hidroeléctrica, térmica, eólica y solar. La red de transmisión está en constante expansión para satisfacer la demanda creciente y mejorar la calidad del suministro en todo el país. Los retos a los que se enfrenta son los siguientes:

- **Capacidad Limitada de Transmisión:** Las líneas de transmisión actuales tienen limitaciones que dificultan la integración de nuevas fuentes de generación renovable, especialmente en las regiones occidentales del país.
- **Desigualdad en el Acceso a la Electricidad:** Existen disparidades significativas en el acceso a la electricidad entre las áreas urbanas y rurales, y especialmente en las comarcas indígenas, donde el acceso es considerablemente menor.
- **Problemas de Confiabilidad y Calidad:** La red enfrenta desafíos relacionados con la confiabilidad del suministro y la calidad de la energía, con interrupciones frecuentes y fluctuaciones que afectan la estabilidad del servicio.

Panamá tiene varios planes en marcha para mejorar y expandir su red eléctrica con el objetivo de abordar estos problemas y apoyar la integración de más energías renovables y la mejora de la confiabilidad y calidad del suministro. Entre estos planes se puede mencionar:

- **Plan Energético Nacional 2015-2050:** Este plan incluye la expansión de la capacidad de transmisión y generación, con un enfoque en la integración de fuentes de energía renovable y la mejora de la resiliencia de la red. Adicionalmente se busca fortalecer el departamento de planificación de la Secretaría Nacional de Energía para mejorar la integración de generación renovable variable y sistemas de almacenamiento.
- Otras iniciativas contemplan la extensión de la cobertura eléctrica a áreas rurales y comarcas indígenas para reducir las disparidades en el acceso a la electricidad. Finalmente, también se fomenta la generación distribuida y el autoconsumo para aumentar la participación de energías renovables en la matriz energética nacional.
- **Plan Indicativo de Generación 2022-2036:** Se detallan las inversiones previstas para la expansión del sistema interconectado nacional, incluyendo nuevas subestaciones y líneas de transmisión que mejorarán la capacidad de transportar energía renovable así como mejorar la confiabilidad del sistema por medio de la implementación de tecnologías inteligentes en la red de transmisión y distribución que mejora la gestión de la demanda y la integración de energías renovables.
- **Interconexión Eléctrica con Colombia:** El proyecto de interconexión con Colombia permitirá transportar hasta 400 MW de electricidad entre los dos países, mejorando la seguridad del suministro y la integración regional.

4. Documentación relativa a energías del mar en Panamá

A continuación se citan los documentos consultados.

Num	Nombre del documento	Descripción
1	Plan Estratégico Nacional para el Desarrollo de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación (PENCYT) 2019-2024. Panamá.	Documento de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT). (2019).
2	Plan Energético Nacional 2015-2050. Panamá.	Secretaría Nacional de Energía de Panamá. (2015).

3	Política Nacional de Producción Más Limpia. Panamá.	Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM). (2007)
4	Procedimientos para la Obtención de Licencias de Generación Eléctrica en Panamá. Panamá	Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2023)
5	Procedimiento para la Conexión de Energías Renovables. Resolución No. 5399, Panamá	Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2012)
6	Procedimiento para la Operación de Centrales Eléctricas Limpias. Panamá.	Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2017)
7	Regulaciones para Autogeneradores de Electricidad en Panamá. Panamá.	Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2023)
8	Regulaciones para Autogeneradores de Electricidad en Panamá. Panamá	Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. (ETESA). (2022)
9	Reglamento de Transmisión. Panamá.	Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. (ETESA). (2022)
10	Tomo II - Plan Indicativo de Generación 2022-2036. Panamá	Secretaría Nacional de Energía de Panamá. (2022). Proyectos Eólicos y Solares: Este documento detalla los proyectos eólicos y solares en desarrollo en Panamá, incluyendo datos sobre capacidad instalada y licencias otorgadas. Aunque se centra más en proyectos terrestres, proporciona un marco de referencia para el desarrollo de energías renovables en el país
11	Política Nacional de Océanos de Panamá. Panamá	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2023)
12	Agenda de Transición Energética 2020-2030. Panamá	Secretaría Nacional de Energía de Panamá. (2020)
13	Fortalecimiento Institucional del Sector Eléctrico y Plan de Transición Energética de Panamá. Panamá	Secretaría Nacional de Energía de Panamá. (n.d.)
14	Régimen de Incentivos para la Promoción de Energías Renovables. Gaceta Oficial, Panamá	Asamblea Nacional de Panamá. (2004). Ley 45 de 2004
15	Normas para la Conexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red Eléctrica. Panamá	Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2017)
16	Código de Redes para la Conexión de Generación Eólica al Sistema Interconectado Nacional. Panamá	Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2017)
17	Regulaciones y Directrices para la Generación Distribuida. Panamá	Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2023)
18	Características Operacionales de Plantas Generadoras de Electricidad en Panamá. Panamá	Secretaría Nacional de Energía de Panamá. (2021)

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN EL PERÚ

Gustavo Omar Guarniz Avalos (Universidad Tecnológica del Perú)
Jorge L. Mirez Tarrillo (Universidad Nacional de Ingeniería)

1. Políticas energéticas en energías del mar

En el Perú la regulación sobre energías renovables se basa en los siguientes documentos, ellos fueron elaborados entre 2008 y 2013.

- Una Promoción de la Inversión para la Generación de Electricidad con el Uso de Energías Renovables del año 2008 (decreto legislativo N°1002);
- Una Política Energética Nacional del Perú 2010-2040 (Decreto Supremo N° 064-2010-EM);
- Un Reglamento de la Generación de Electricidad con Energías Renovables (Decreto Supremo N°012- 2011-EM), y;
- Un Reglamento para la Promoción de la Inversión Eléctrica en Áreas No Conectadas a Red (Decreto Supremo N° 020-2013-EM).

Cuando se dio el Decreto Legislativo N° 1002, la única energía renovable marina que se contempló fue la energía mareomotriz. Sin embargo, el Congreso de la República del Perú, el 05 de marzo de 2024 estableció un marco legal para priorizar la ejecución de proyectos de inversión de energía undimotriz, esto significa que se reconoce a la energía undimotriz como energía renovable del punto vista legal, y por ende, se incluye este tipo energía en el Decreto Legislativo N° 1002. El detalle de esta información se encuentra en:

<https://comunicaciones.congreso.gob.pe/noticias/establecen-marco-legal-para-priorizar-ejecucion-de-proyectos-de-inversion-de-energia-undimotriz/>

En la actualidad, en el Perú no existe una hoja de ruta de renovables. Por parte del Estado Peruano, existe un Plan Energético Nacional de 2014 - 2025 y una Hoja de Ruta de Redes Energéticas Inteligentes. Este último indica, que esta hoja de ruta facilitará la integración de las energías renovables. Existe una Hoja de Ruta de Transición Energética en el Perú al 2050 que fue promovido en 2023 por Grupo Enel Perú y Deloitte. En 2023, el Banco Internacional de Desarrollo, elaboró el documento "Hacia una agenda de transición energética en el Perú: una propuesta". Ambos documentos promueven la implementación de una transición energética, enfocándose en las acciones legales y regulatorios necesarias. Un documento que analiza la industria de la Energía Renovable en el Perú fue elaborado por OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería), este documento fue publicado en 2017.

Con respecto al recurso renovable marino, el Perú ha dado un primer paso al incluir la energía undimotriz en el Decreto Legislativo N° 1002. Por las propias características del mar peruano, este tipo de energía tiene más futuro que la energía mareomotriz, la única que se reconocía del punto vista legal en el Perú. Al incluir la energía undimotriz en este decreto legislativo, faculta al Ministerio de Energía y Minas a convocar a empresas internacionales a presentar proyectos de inversión de la explotación de este recurso en la costa peruana. La inclusión de este tipo de energía direcciona a una baja en el costo por consumo energético.

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con las energías del mar

En el Perú en el año 2017 a través de la embajada británica de Lima la empresa Aquatera realizó un estudio titulado “Recomendaciones para el desarrollo de la energía renovable acuática del Perú”. Según dicho estudio se consideró desde el inicio los recursos marinos como energía undimotriz, energía eólica offshore, energía mareomotriz, corrientes marinas y gradiente marino. Debido al bajo potencial mostrado de algunos de estos recursos, el documento mostró solamente el potencial de los recursos marinos más relevantes, que corresponde a los dos primeros, energía undimotriz y eólica offshore, ver figura 1. El recurso de eólica offshore mostró un potencial medio de alrededor de 2 a 3,5 GW como potencial extraíble. Este recurso es localizado en la parte norte y centro de la costa peruana, en un área limitada con una profundidad adecuada, la velocidad del viento oscila entre 5 a 7 m/s.

Por otra parte, la energía undimotriz mostró un potencial alto según el estudio. Considerando toda la costa peruana, la energía undimotriz máxima extraíble puede alcanzar los 3,5 GW. Sin embargo, en la parte centro y sur de la costa se destacan con un potencial de 1.75 GW y 1.1 GW, respectivamente. La característica del Mar Peruano muestra un potencial máximo 25 kW/m con olas energéticas en toda la costa.

En estos momentos, en el Perú no existe una explotación de la energía marina y no existe un entramado industrial en este tipo de tecnología. Según el informe de Aquatera, tan solo hubo un registro de dos testeos realizado por la empresa Atmocean en 2015; esta empresa se dedica a ofrecer un sistema desalinizador que aprovecha la energía de las olas. La empresa afirmó que el 80 % de esta tecnología podía construirse en Perú. Las empresas constructoras en Perú han mostrado capacidad en infraestructuras marítimas, específicamente en proyectos portuarios, entre algunas empresas se puede mencionar:

- JJC grupos (<https://grupojjc.com.pe/proyectos/>),
- COSAPI (<https://www.cosapi.com.pe/Site/Index.aspx?aID=1401>),
- ICCGSA (<https://www.iccgsa.com/proyectos/obras-maritimas-y-portuarias/culminadas>).

Los astilleros en el Perú son las empresas más relacionadas con la construcción y mantenimiento de artefactos navales, dedicada mayormente a la flota de la industria pesquera. Uno de los principales astilleros es SIMA Perú (<https://www.sima.com.pe/>), y en marzo del presente año el astillero ha informado que Hyundai Heavy será coproductor para el inicio de proyectos de grandes dimensiones.

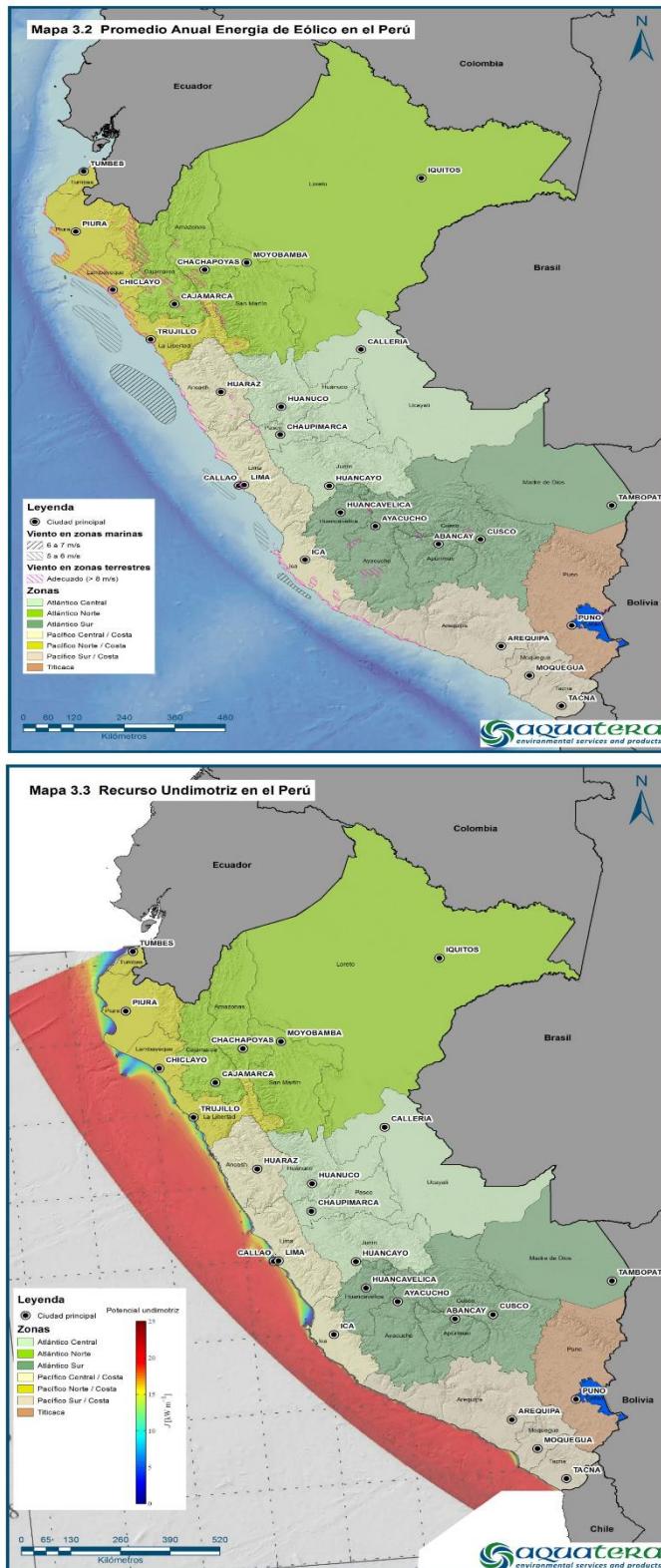


Figura 1. Recurso eólico y undimotriz del Perú (extraído de “Recomendaciones para el desarrollo de la energía renovable acuática del Perú”, empresa Aquatera)

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de nuevas energías renovables

En el Perú la integración de centrales eléctricas a la red, se llama Procedimiento Técnico del COES SINAC (Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional) PR-20: Ingreso, Modificación y Retiro de Instalaciones en el SEIN que determina los requisitos y procesos a seguir para la integración, modificación o retiro de instalaciones eléctricas del SEIN, así como establecer las condiciones para la aprobación del inicio, suspensión o conclusión de Operación Comercial de unidades o centrales de generación. En todos los casos, los requisitos establecidos se orientan a evitar cualquier impacto negativo sobre la confiabilidad y calidad de las operaciones del SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional). El capítulo 4 de dicho procedimiento técnico se detalla los requisitos de conexión de las instalaciones de centrales de generación no convencional (CGNC) con Recursos Eléctricos Renovables (RER), cuya tecnología no utiliza un generador síncrono conectado directamente o mediante un transformador al SEIN, con potencias iguales o mayores a 500 kW.

Básicamente, la generadora y el COES SINAC, coordinan y realizan los siguientes productos de este Procedimiento bajo reglas y criterios técnicos internos de COES SINAC:

- Conformidad del Estudio de Pre-Operatividad.
- Conformidad del Estudio de Operatividad.
- Conformidad de Integración al SEIN.
- Conformidad de inicio de Operación Comercial de Unidades o Centrales de Generación.
- Conformidad de conclusión de Operación Comercial de Unidades o Centrales de Generación.
- Conformidad de retiro de instalaciones del SEIN.

En el Perú existe un Plan de Transmisión que programa el diseño, construcción y puesta en servicios de líneas de transmisión y sub-transmisión a nivel nacional, y constantemente se actualiza en función a la demanda que pueden ser nuevos proyectos mineros, ampliación de suministro de carga, instalación de nuevas centrales eléctricas. En la actualidad, este plan se llama “Plan de Transmisión 2023-2032” y fue aprobado mediante Resolución Ministerial Nº 459-2022-MINEM/DM del Lima, 29 de diciembre de 2022

(<https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/2139479-1>).

A la fecha (junio 2024) ya se viene elaborando la Actualización Plan de Transmisión 2025-2034 liderado por el COES SINAC (Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional) y en coordinación con el Ministerio y reguladoras

(<https://www.coes.org.pe/Portal/Planificacion/PlanTransmision/ActualizacionPTI>).

4. Documentación relativa a energías del mar en Perú

Perú		
Num	Nombre del documento	Contenido del documento
1	Recomendaciones para el desarrollo de la energía renovable acuática en el Perú	Análisis de los recursos marinos en el Perú.
2	Política energética nacional del Perú 2010-2040	Decreto Supremo Nº 064-2010-EM que contempla las energías renovables.
3	Promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables.	Decreto legislativo Nº1002 que contempla las energías renovables.
4	Reglamento de la Generación de Electricidad con Energías Renovables	Decreto Supremo Nº012- 2011-EM que contempla las energías renovables.
5	Reglamento para la Promoción de la Inversión Eléctrica en Áreas No Conectadas a Red	Decreto Supremo N° 020-2013-EM que contempla las energías renovables.
6	Plan energético nacional 2014-2025	Plan energético nacional 2014-2025
7	Hoja de Ruta Redes eléctricas inteligentes	Hoja ruta de distribución de Smartgrid
8	Hoja de Ruta de Transición Energética en Perú según Enel y Deloitte	Hoja de ruta de transición energética desarrollada por Enel y Deloitte
9	La industria de la Energía Renovable Perú	Es un análisis sobre la industria de los recursos renovables realizada por el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN)
10	Procedimiento técnico de Ingreso, Modificación y Retiro de Instalaciones en el SEIN	Requisitos de conexión de las instalaciones de centrales de generación no convencional (CGNC) con Recursos Eléctricos Renovables (capítulo 4).
11	Plan de Transmisión 2023-2032	Plan de Transmisión 2023-2032
12	Propuesta de actualización del plan de transmisión 2025-2034	Propuesta de actualización del plan de transmisión 2025-2034
13	Hacia una agenda de transición energética en el Perú: una propuesta	Propuesta por parte del Banco Internacional de desarrollo para una transición energética en el Perú.

5. Conclusiones finales y recomendaciones

En regiones específicas, el mar del Perú muestra un potencial energético undimotriz y eólico offshore interesante, con un potencial alto y medio, respectivamente. La realidad de la industria actual del país tiene la capacidad de adaptarse a este nuevo desafío tecnológico exigente. Sin embargo, del punto de vista político, se observa una lentitud de reconocer el potencial del recurso marino y fomentar su explotación. Recién en el presente año 2024, se ha reconocido la energía undimotriz del punto de vista legal. Existe otros recursos renovables más competitivos, como la eólica y solar en tierra, que no han sido impulsados debidamente. Lamentablemente, en el Perú no existe una hoja de ruta de energía renovable. El país muestra un retraso en las metas exigidas internacionalmente con respecto a la responsabilidad del cambio climático. Según “Decreto Supremo que declara de interés nacional la Emergencia Climática” el Perú se ha comprometido en reducir en un 40% las emisiones de gases de efecto invernadero a finales de esta década. El Decreto Supremo N.º 003-2022-MINAM (DS003) en 2022, ha trazado el objetivo al 2030 tener el 20% de la matriz energética basada en energías renovables no convencionales.

La evolución energética del país indica, que la matriz energética hasta 2002 fue basada prácticamente en centrales hidroeléctricas; sin embargo, el descubrimiento de las reservas de gas natural en el país ha cambiado este panorama. Según el COES SINAC (Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional), este recurso a través de centrales termoeléctricas representa entre el 35% al 45% de la producción energética, y alrededor del 5% corresponde solamente a la energía eólica y solar. En el país, la subasta es el único medio de apoyo público para la implementación de energía renovable. Y la última subasta según OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería) fue afín del 2015. En 2023, según el documento “Hacia una agenda de transición energética en el Perú: una propuesta” elaborado por el Banco Internacional de Desarrollo, indica que es necesario contar con una Ley de Transición Energética, para realizar una transición justa en el Perú. Los subsidios que recibe la industria que genera electricidad o servicio a través de los combustibles fósiles, hace atractivo el consumo de este combustible, y genera dependencia. No deja ver la verdadera realidad del costo y tomar conciencia de los efectos climatológicos con la seriedad pertinente. Además, esto genera una desventaja en la promoción de la energía renovable en el país, esto se refleja en “las actas de las sesiones de la comisión de energía y minas” de la última década, la discusión de proyectos con combustible fósil sigue siendo prioridad.

Otro punto muy influyente, es la inestabilidad política de los últimos años en el país, el cual no ha ayudado a generar objetivos claros y constantes con respecto a la transición energética. A pesar de existir claramente una barrera política en la transición energética, es necesario que la academia contribuya en fortalecer el conocimiento de los recursos renovables propios del país y el potencial de las nuevas tecnologías para su explotación. Los recursos renovables marinos es un claro ejemplo de recurso con potencial pero poco reconocido a nivel nacional.

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN PORTUGAL

Ana Brito e Melo (WavEC – Offshore Renewables)

6. Políticas energéticas en energías del mar y renovables.

Portugal's energy sector policy focuses on decarbonizing the energy supply and reducing reliance on energy imports by prioritizing broad electrification, a rapid expansion of renewable electricity generation, and improved energy efficiency. The Directorate-General for Energy and Geology (DGEG), under the Ministry for the Environment and Climate Action, is responsible for developing and implementing these policies.

The **Roadmap for Carbon Neutrality 2050 (RNC 2050)**, approved in 2021, sets ambitious goals for greenhouse gas (GHG) emissions reductions of 85–90% by 2050 compared to 2005 levels, achieving the **complete decarbonization of electricity generation and transport**, and leveraging **carbon sequestration** to reach net-zero emissions. This long-term vision is supported by the **National Energy and Climate Plan 2030 (PNEC 2030)** which is the strategic framework for addressing energy and climate challenges up to 2030. Together with complementary frameworks like the **National Strategy for Hydrogen**, the PNEC 2030 provides a comprehensive roadmap to align short- and medium-term actions with the transformative objectives of the RNC 2050, advancing Portugal's transition to a sustainable, low-carbon economy.

In October 2024, Portugal revised the **National Energy and Climate Plan 2030 (PNEC 2030)** to include more ambitious targets, reflecting the country's commitment to accelerating its energy transition. The updated plan sets a goal of achieving **2 GW of offshore wind capacity** and **0.2 GW of wave energy** by 2030.

A key milestone in this strategy is the **first auction for floating offshore wind capacity**, scheduled for early 2025. This auction aims to allocate and establish the initial 2 GW of capacity, creating a foundation for the development of Portugal's marine renewable energy sector. Depending on the maturity of processes and the progression of projects, additional phased auctions may follow, with the potential to allocate **up to 10 GW of offshore wind capacity** by 2030.

Offshore wind energy is expected to play an increasingly significant role in Portugal's energy landscape. While it is noted that the deployment of offshore wind projects requires careful balancing with other interests—such as environmental protection, national defense, and existing economic activities like fishing, tourism, and navigation—the potential for sustainable and mutually beneficial renewable energy projects is clear. Addressing the challenge of deep-sea installations, the development of floating offshore wind technologies is particularly promising.

Wave energy also holds significant promise in Portugal. Supporting pilot projects and enabling their expansion into new areas is considered essential for advancing this technology.

Portugal has also a **National Ocean Strategy 2021-2030**³, which defines the framework for the public ocean policy promoting the ocean's contribution to the national economy while

³ <https://www.dgpm.mm.gov.pt/enm-21-30>

ensuring a healthy and sustainable marine environment. The strategy is built around 10 key objectives, including combatting climate change, decarbonizing the economy through renewable energy promotion, and fostering scientific knowledge, technological development, and blue innovation. To implement these goals, an **Action Plan** was published in September 2021, detailing specific measures across various domains, including actions relevant to **Marine Renewable Energies**.

Portugal implemented the **Maritime Spatial Plan (“PSOEM”)** which encompasses the entire Portuguese maritime space, from the baselines to the outer limits of the continental shelf and serves as a strategic tool for maritime spatial planning providing guidance on the allocation of maritime uses and activities. Accessible at www.psoem.pt, the Plan identifies existing and potential uses, as well as exclusion areas, ensuring a balanced and sustainable approach to managing marine resources. Furthermore, the PSOEM enables the issuance of **Permits for Private Use of the National Maritime Space (TUPEM)**, streamlining licensing processes for stakeholders.

In 2022, following the government's announcement of plans for a 10 GW offshore wind auction, the PSOEM underwent a review to incorporate potential areas for commercial offshore renewable energy projects. This integration process entails:

- Identifying suitable areas for offshore wind development.
- Determining connection points to the electrical grid.
- Developing grid and port infrastructure to support deployment.
- Establishing clear procedures for conducting offshore renewable energy bids.

In January 2022, **Decree-Law No. 15/2022** was introduced, establishing the operational framework for the **National Electric System (SEN)** and creating legal provisions for **Technological Free Zones (ZLTs)**. These zones are specialized spaces for testing and demonstrating innovative technologies under real-world conditions, guided by specific legislation and regulatory oversight. This initiative aims to streamline research and experimental activities through simplified legal mechanisms.

Building on this momentum, the government approved the creation of a **Technological Free Zone for oceanic renewable energies** offshore Viana do Castelo on October 4, 2023. Covering an area of 7.63 km², this ZLT supports innovation and development in marine renewable energy, particularly electricity generation. Strategically located near the **WindFloat Atlantic project**, Europe's first floating wind farm, this initiative signals Portugal's commitment for the energy transition.

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con las energías del mar

The potential for offshore wind and wave energy in Portugal has been thoroughly quantified by the National Laboratory of Energy and Geology (LNEG)⁴:

- For **offshore wind energy**, using a capacity density of **4 MW/km²** for floating offshore and **5.5 MW/km²** for fixed-bottom offshore installations, the technical potential is **36 GW** and **2 GW**, respectively, totaling **38 GW** for offshore wind technology. This capacity could generate up to **126.14 TWh/year** (floating offshore) or **6.31 TWh/year** (fixed-bottom offshore).
- Regarding **wave energy**, the resource potential is estimated to range between **1.4 GW** for areas with a depth of 80 meters and **4.8 GW** for areas with a depth of 20 meters.

Portugal has established two test zones for marine renewable energy projects. These zones have been selected based on detailed studies of their bathymetry, seabed characteristics, and resource availability:

- One of these zones is the **Aguçadoura Ocean Lab for Future Technologies**, located off Aguçadoura. This maritime area spans **3.3 km²** and has a depth of around **50 meters**. Electricity generated by devices can be injected into the power grid via a **4 MW submarine cable**, which is **5 km long** and connected to an onshore substation. Three projects previously tested at this site include the **Archimedes WaveSwing**, **Pelamis**, and the **WindFloat Demo**. Currently, the site is hosting the CorPower Ocean project, which involves the deployment of its first commercial-scale Wave Energy Converter.
- The second zone, **Viana do Castelo Pilot Zone**, is located offshore Viana do Castelo. Covering an area of **11 km²** and with depths ranging from **85 to 100 meters**, it is designed for the demonstration of technologies at pre-commercial phase. This site features a **40 MW submarine cable, 17 km long**, connected to an onshore substation.

Portugal's industrial capacity for marine renewable energies development is being actively shaped by international interest and collaboration. In November 2023, Portugal sought expressions of interest from developers to participate in an offshore wind tender. The call for expressions of interest attracted fifty companies from more than ten countries, including major international developers such as Ocean Winds, Iberdrola, Equinor, RWE and Corio. This demonstrates a strong global interest in investing in Portugal's offshore wind sector, indicating that the country is seen as a viable and attractive market for renewable energy projects. The involvement of well-established developers suggests that Portugal has the opportunity to leverage international expertise and investment to build its offshore wind supply chain and infrastructure. This also highlights the potential for developing or expanding domestic industries

⁴ <https://offshoreplan.lneg.pt/>

to support offshore wind components, construction, and maintenance, thereby enhancing local industrial capacity.

On the other hand, the experience with the Windfloat project revealed that the existing national port infrastructure is insufficient to fully support the industrial development of offshore wind energy, which means an urgent need for significant upgrades and strategic planning. Despite these limitations, there is considerable potential for developing port infrastructure. A recent recommendation by a government-appointed working group advocates for the **specialization of each port** to support the construction, operation, and maintenance of future wind farms. Careful planning and customization of each port's role within the offshore wind value chain are considered essential. This approach aims to ensure that port infrastructure meets the specific spatial and operational demands of the floating offshore wind sector, which requires extensive storage and handling capabilities.

The development of a comprehensive strategy to establish the industrial supply chain for this sector has also been identified as a priority. Efforts are already underway, with a preliminary analysis of both national and international contexts, to position Portugal as a key player in the offshore wind industry.

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de nuevas energías renovables

The Portuguese government is actively assessing the capacity of the country's electrical infrastructure to support the integration of offshore renewable energies through a dedicated task force established in September 2023. This task force was responsible for producing a comprehensive report that addresses the critical challenges and opportunities associated with offshore energy development.

Preliminary studies were conducted to identify locations for new installations where connection points to the onshore grid will be established. Alternative architectures for the offshore Public Service Electricity Grid (RESP) were studied, considering costs associated with its establishment, operation, losses, and decommissioning, as well as aspects related to reliability, environmental impacts, and effects on other maritime and terrestrial activities. By addressing these aspects, the government aims to establish a robust framework for optimizing Portugal's electrical infrastructure to support offshore renewable energies.

In summary, Portugal is planning a structured and technologically informed approach to integrate offshore renewable energies into its grid, focusing on efficiency, scalability, and cost-effectiveness while addressing the unique challenges of deep-water installations.

4. Documentación relativa a energías del mar en Portugal

Portugal		
Num	Nombre del documento	Contenido del documento
1	Roadmap for Carbon Neutrality 2050 (RNC 2050)	Establishes a sustainable trajectory to achieve carbon neutrality by 2050. It outlines the main guidelines and identifies cost-effective options to reach this goal under different socio-economic development scenarios
2	National Energy and Climate Plan 2030 (PNEC 2030)	Submitted to the European Commission establishing, among other aspects, new national targets for GHG (greenhouse gas) emission reductions and new targets for the inclusion of energy from renewable sources, including new actions, measures, and policies to be adopted for its implementation.
3	National Ocean Strategy 2021-2030	Portugal's overarching policy framework for the sustainable development and management of its ocean resources. It serves as the key public policy instrument to guide activities related to the ocean, including marine renewable energies.
4	Maps of Offshore Wind and Wave resources	Available at: https://offshoreplan.ineg.pt/
6	Decree-Law No. 15/2022 “Organization and Operation of the National Electric System”	Establishes the organization and operation of the National Electric System (SEN).
7	Report “Working Group for the Planning and Operationalization of Power Generation Centers Based on Renewable Ocean Energy Sources”	In June 2023, the Working Group presented its report to the government officials responsible for the areas of the Sea, Energy, and Infrastructures. The report includes conclusions and recommendations aimed at advancing offshore renewable energy projects in Portugal

5. Conclusiones finales y recomendaciones

Portugal's energy policy is closely aligned with its maritime resources, reflected in initiatives like the National Ocean Strategy 2021-2030 and the National Energy and Climate Plan 2030.

The WindFloat Atlantic project established Portugal as a pioneer in floating offshore wind technology. This project demonstrated the viability of innovative solutions and positioned the country as a key player in this emerging sector. Recent initiatives, including the government's open call for offshore wind projects with an installed capacity of 2 GW and site allocation for 10 GW by 2030, highlight its commitment to unlocking this potential.

Also, the CorPower's wave energy project deployed at the Aguçadoura test site complements Portugal's pioneering efforts in floating offshore wind, contributing to significantly advance the country's leadership in marine renewable energy and showing the nation's commitment to diversifying its renewable energy portfolio.

The industrial capacity is very closely linked with the existing port and industrial infrastructure to support large-scale offshore renewable energy projects. However, there is substantial potential for development, particularly through port specialization and industrial upgrades. The transition of ports from logistical hubs to specialized industrial centers is essential for assembling, maintaining, and supporting offshore renewable energy projects. Also, the offshore renewable energy integration into the National Electricity Transmission Grid requires the development of offshore substations, optimized interconnections, and alignment with maritime spatial planning. Preliminary analysis indicates a need for a national strategy to build a cohesive industrial supply chain, attract investment, and position Portugal competitively in the global offshore renewable energy market.

Recommendations:

1. Build on the success of the WindFloat Atlantic project and experience with wave energy deployments to further enhance technological expertise and innovation in marine renewable energies, establishing Portugal as one leader in this market.
2. Create a national strategy to develop a robust supply chain for offshore renewable energy. This should include port specialization, workforce training, and incentives for private investment in manufacturing, assembly, and maintenance facilities.
3. Ensure that industrial and grid infrastructure is developed ahead of offshore project deployment to avoid delays, maximize efficiency, and reduce costs.
4. Continue refining Maritime Spatial Planning practices to designate areas for offshore renewable energy while minimizing conflicts with other maritime activities. Incorporate feedback from stakeholders, including the fishing and environmental sectors, to ensure long-term sustainability.
5. Promote investment in R&D for floating wind and wave energy technologies to address remaining technical and cost barriers. Collaborate with international developers and research institutions to maintain a competitive edge.

LAS ENERGÍAS DEL MAR EN URUGUAY

Rodrigo Alonso Hauser (Universidad de la República)
Rodolfo Pienika Archondo (Universidad de la República)
Juan Villemur Reyes (Universidad de la República)

1. Políticas energéticas en energías marinas/renovables

A la fecha Uruguay no dispone de ninguna regulación que aplique específicamente a las energías marinas. Si existe un marco regulatorio que influye sobre las energías renovables, el cual ha jugado un rol fundamental en el desarrollo que han tenido. En este contexto se destaca la Ley reguladora del marco energético (Ley N° [16832](#)), la cual consagra a la generación de energía eléctrica como una actividad de libre iniciativa por parte de cualquier sujeto público o privado, mientras que otorga la calificación de servicio público a la trasmisión y la distribución, en cuanto se destinen total o parcialmente a terceros en forma regular o permanente. Tanto la actividad de transmisión como la de distribución son prestadas en todo el país por el ente estatal Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE). A su vez esta ley dio origen a dos entidades públicas encargadas de administrar, controlar y regular las actividades relacionadas con el suministro eléctrico, estas son la Unidad Reguladora de la Energía Eléctrica, posteriormente ampliada en sus competencias a través de la Ley N° [17598](#) en la Unidad Reguladora de Servicios de Energía y Agua (URSEA) y la Administración del Mercado Eléctrico (ADME). Bajo esta nueva organización, la forma jurídica de mayor impacto para el desarrollo de las renovables fue el [decreto 77/006](#), el cual exhorta a UTE a contratar potencia de fuente renovable. Las tres fuentes de energías renovables con mayor desarrollo a partir de esto fueron: eólica (continental), solar y biomasa, lo que acompañó la normativa específica para promover y regular estos tres sectores.

En cuanto a aspectos ambientales, la evaluación y autorización de un emprendimiento de energías renovables marinas se rige por lo establecido en la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental (N° [16466](#)). Si bien esta ley no menciona explícitamente este tipo de emprendimientos, si hace alusión directa a usinas de generación de electricidad de más de 10 MW, cualquiera sea su fuente primaria, y a proyectos con potencial afectación de la faja de defensa costera.

Ley N° [18597](#) “Ley de uso eficiente de la energía”. En su artículo 19 asigna al Fideicomiso Uruguayo de Ahorro y Eficiencia Energética (FUDAEE) la competencia de financiar actividades de investigación y desarrollo en eficiencia energética y la promoción de energías renovables.

Finalmente, el derecho de uso de áleos públicos para el desarrollo de emprendimientos (ej. uso de espacio marítimo para emprendimientos de generación de energía) está reglamentado por el Código de Aguas (Ley N° [14859](#)) en sus artículos 162 y siguientes. El Código, entre otros muchos aspectos, establece que el plazo máximo por el cual se otorga una concesión es de 30 años dependiendo de la magnitud del proyecto.

A la fecha Uruguay no dispone de una hoja de ruta de energías renovables marinas ni una hoja de ruta de energías renovables donde exista un capítulo sobre renovables marinas. Si existe una planificación de la política energética 2005-2030, documento que ha marcado el camino recorrido en la concreción de la primera transición energética y puesta en marcha de la segunda. A su vez, contemplando un horizonte temporal más amplio, la Oficina de Planeamiento y Presupuesto (OPP) elaboró en 2019 un propuesta de estrategia para el desarrollo de las

renovables al 2050, documento basado en el producto de la consultoría llevada adelante por la empresa uruguaya [ERGO](#) y la Universidad de Externado (Colombia).

Por otra parte, existe una hoja de ruta para el hidrógeno verde, que contempla la explotación de la energía eólica offshore para la producción de hidrógeno, incluyéndola en la fase 2 y 3 de dicho plan.

Más recientemente, la Agencia Uruguay XXI elaboró en 2023 el informe “Energías renovables en Uruguay”, documento integral que expresa de forma clara y sintética el estado de situación de las energías renovables en el país, así como las oportunidades que ofrece el sector.

Hasta la fecha, las medidas existentes para impulsar y potenciar la cadena de valor de las energías marinas en Uruguay provienen únicamente de la academia, y recientemente ha involucrado a los impulsores de la producción de hidrógeno verde.

Respecto a este punto, para avanzar hacia los objetivos planteados en la hoja de ruta en lo que refiere a uso de la eólica *offshore*, se inició en diciembre 2022 el programa H2U offshore. Su cometido es llevar adelante un proceso competitivo para la prospección y evaluación de producción de hidrógeno verde a partir de eólica offshore un para un eventual desarrollo futuro. En este sentido, se prevé que para el año 2025 se lancen las primeras rondas de licitación para exploración de eólica offshore en bloques marinos de aproximadamente 500 km² y posterior producción de hidrógeno verde.

Desde la academia, se han tomado medidas tendientes a la capacitación de recursos humanos y a la generación de conocimiento local en el tema. En cuanto a lo primero, se cuenta desde el 2019 con un curso sobre energías marinas con particular foco en la energía undimotriz en el programa de posgrado de Ingeniería de la Energía de la Universidad de la República (UdelaR), centro de estudio que también ha incluido la temática de energía en un nuevo programa de Licenciatura en Oceanografía, actualmente en proceso de elaboración. En lo que respecta a generación de conocimiento local se han desarrollado distintos proyectos de investigación sobre energías marinas en la UdelaR, y recientemente en lo que respecta a eólica *offshore* también se ha involucrado la Universidad Tecnológica (UTEC). Se destaca como medida de incentivo al desarrollo de este tipo de proyectos el Fondo Sectorial de Energía que gestiona la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) a partir de recursos aportados por las dos principales empresas públicas del sector energético: UTE y ANCAP (combustibles).

2. Recurso, capacidad industrial e instalaciones experimentales relacionadas con la energía del mar

Por estar Uruguay en una zona templada (i.e. limitado gradiente térmico), micromareal (i.e. corrientes de marea de baja intensidad) y por la gran extensión del estuario del Río de la Plata con una dinámica de su frente salino que complejizaría el aprovechamiento de su gradiente salino, el foco en la evaluación de los recursos energéticos marinos estuvo puesto en la energía undimotriz. Este fue evaluado a partir de un hindcast de oleaje calibrado y validado con mediciones in-situ y altimétricas. Este abordaje y la presentación de los resultados obtenidos se presenta en [Alonso et al. \(2015\)](#). Los principales resultados se enumeran a continuación:

- Se cuenta con una potencia undimotriz media de 30 kW/m a 200 km de la costa, la cual se reduce a 20 kW/m a una distancia de 70 km de la costa y presenta valores de entre 9 y 13 kW/m en las proximidades de la costa Atlántica. Para relativizarlo en términos de la dimensión de país, integrando este resultado a lo largo de toda la costa Atlántica se obtiene un potencial que duplica la actual demanda promedio anual de energía eléctrica del país.
- En el límite exterior del Río de la Plata se tienen 10 kW/m, los cuales decaen a 1 kW/m donde comienza el Río de la Plata intermedio, y continúan decreciendo hacia el Río de la Plata interior. Por lo que solamente el Río de la Plata exterior acompañaría a la costa Atlántica y a la plataforma continental como zonas promisorias para el aprovechamiento undimotriz considerando la magnitud del recurso.
- Además del potencial medio de las zonas identificadas como promisorias, se destacan otros aspectos del recurso como son la poca variabilidad inter-anual y estacional, y lo relativamente benigno de los eventos extremos.

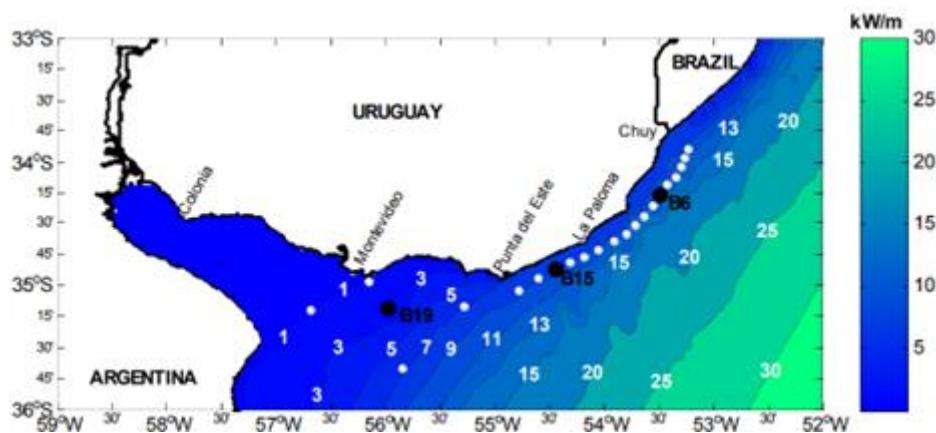


Figura 1. Mapa del potencial undimotriz en la costa Atlántica Uruguaya.

A pesar de ser una zona micromareal, el Río de la Plata y su frente marítimo constituyen un sistema complejo influenciado por más forzantes que la marea astronómica (i.e. caudales de aporte, viento local, ondas de marea meteorológica), lo cual motivó un estudio sobre el recurso

hidrocinético (Schenzer et al. 2014), el cual permitió identificar zonas donde las corrientes presentan mayor intensidad (con resultados poco prometedores). Estos resultados se complementaron con los del potencial undimotriz para abordar una evaluación que concibe la explotación conjunta de los dos recursos. ([Alonso et al. 2017](#)).

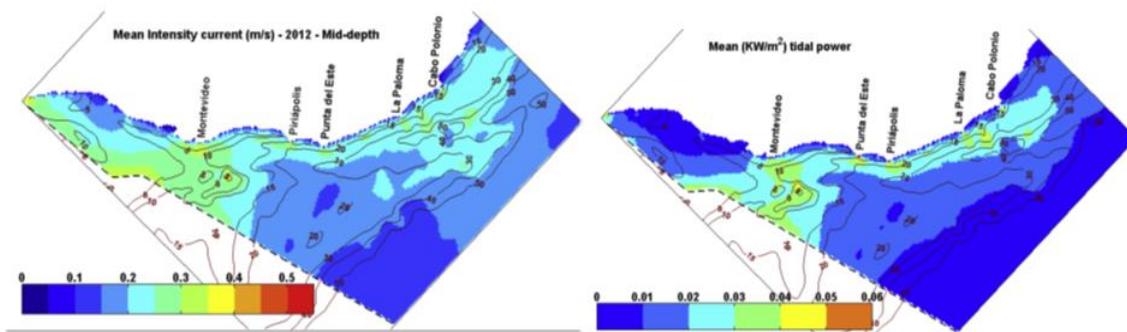


Figura 2. Mapa de velocidades promedio en profundidades medias (izq.) y mapa de potencial mareomotriz en kW/m² usando velocidad promediada en la profundidad (der.).

En lo que respecta a eólica y solar offshore, estos recursos han sido ampliamente mapeados a nivel continental, presentando valores atractivos. Recientemente fue publicado el primer mapa de potencial eólico *offshore*, desarrollado por investigadores de la [UTEC](#), donde se identifican los bloques que se licitaron para exploración del recurso eólico. Asimismo, se cuenta con información del [Atlas Eólico Mundial](#) que incluye mapas de velocidad en la zona de la costa atlántica uruguaya y el potencial técnico de eólica offshore elaborado por el [Grupo Banco Mundial](#).

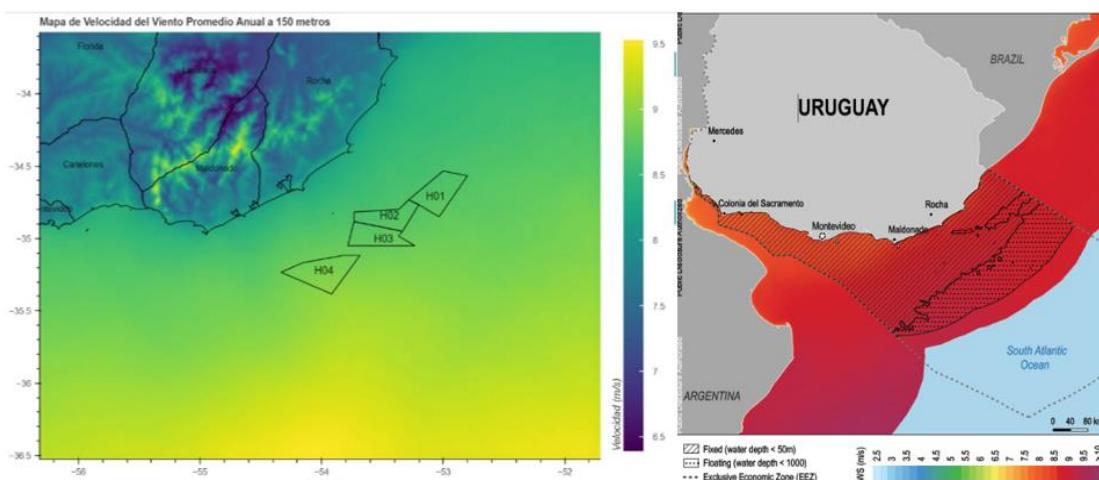


Figura 3. Promedio anual de velocidades de viento a 150 metros obtenido por [UTEC](#) (izq.); potencial técnico de eólica offshore en Uruguay presentado en trabajo del [Grupo Banco Mundial](#) (der.).

Respecto a **empresas nacionales involucradas en actividades marítimas**, se destaca la empresa pública de combustibles ANCAP, que cuenta con una monoboya donde se descarga el petróleo crudo que importa el país. La operativa y mantenimiento de esta monoboya la realiza la propia ANCAP contando con amplia experiencia al respecto, y destacándose aquí por ser una actividad con muchos puntos en común con lo que sería un emprendimiento de generación de energía marina. En relación con la actividad de esta boyas petrolera, se ha establecido la empresa [ICP](#) la cual se ha especializado en el desarrollo de sistemas a medida de generación y almacenamiento de energía para operar en el entorno marino, así como en el diseño de soluciones para el montaje y la protección de equipamiento e instrumental en este entorno.

La actividad portuaria del país, donde destaca el puerto de Montevideo por su relevancia regional, ha dado lugar al desarrollo de diversas empresas que brindan apoyo a la operativa portuaria y a la navegación. Algunas de ellas, como por ejemplo [Utilaje](#) y [Saam Towage](#) han ampliado los servicios que ofrecen hacia actividades *offshore*. A su vez, [Servicios Marítimos](#) es una empresa de larga trayectoria, que cuenta con diversas embarcaciones y plantel de submarinistas con los que puede dar apoyo a variadas actividad en el mar. Finalmente se menciona a [Costa Fortuna Latinoamérica](#) por ser una empresa que brinda servicios de geotécnica y diseño y ejecución de fundaciones especiales, y que cuenta con algunos antecedentes de obras en el entorno marítimo. En el rubro industrial, se destacan las empresas [Ingenal](#), [Nitromar](#) y [Alianza](#).

En cuanto a **instalaciones experimentales**, se destaca a nivel nacional el Canal de Pruebas Navales y Marítimas del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental ([IMFIA](#)) de la Facultad de Ingeniería de UDELAR. El canal mide 70 metros de largo, 1.50 metros de ancho y 1.80 metros de altura, con una profundidad máxima de agua de 1.60 metros. Sus paredes son de hormigón, y cuenta con una zona de ensayos con paredes de vidrio. En uno de los extremos del canal se encuentra un generador de oleaje con capacidad para generar oleaje tanto regular como irregular. Este generador es de tipo pistón y cuenta con un sistema de absorción dinámica del oleaje reflejado. En el otro extremo del canal, se tiene una playa porosa de absorción pasiva con una pendiente de 0.3 m/m para mitigar la reflexión del oleaje. Las dimensiones del canal permiten la instalación de modelos de dispositivos en escalas medias, aproximadamente 1:10, como es el caso del ensayado por [Brito et. al. \(2020\)](#). El canal cuenta con un carro dinamométrico que puede alcanzar velocidades máximas de hasta 3.4 m/s, el cual se puede emplear para ensayar modelos de embarcaciones y turbinas hidrocinéticas. Esta instalación está equipada con una amplia variedad de sensores para medir diferentes variables de acuerdo con los requisitos de cada ensayo. Estos incluyen varios sensores de oleaje de tipo capacitivo distribuidos a lo largo del canal, perfiladores ultrasónicos para obtener perfiles de velocidades, e instrumentos que permiten cuantificar desplazamientos y velocidades de los dispositivos que se ensayan, así como las presiones que se ejercen sobre los mismos.



Figura. Canal de Pruebas Navales y Marítimas del IMFIA.

Además del Canal de Pruebas Navales y Marítimas, el IMFIA cuenta con un banco de ensayos de modelos de turbinas axiales, dónde es posible realizar evaluaciones de modelos diseñados para implantarse en dispositivos de extracción de energías marinas, así como también se cuenta con otros bancos de ensayos que brindan la posibilidad de realizar ensayos en modelos de diversas turbomáquinas utilizadas para este fin.

3. Situación de la red eléctrica en relación con la integración de energías renovables

Uruguay cuenta con una red eléctrica de 83.277 km, lo que le permite cubrir el 99,8% de los hogares con suministro eléctrico. El sistema está compuesto por dos grandes redes de transmisión de alta tensión. Una red de 500 kV de 1.078 km une las cuatro represas hidroeléctricas con el mayor centro de demanda, el área metropolitana de Montevideo. Por otro lado, 3923 km y 72 estaciones de red de 150 kV unen las restantes plantas de generación con casi todas las capitales departamentales y principales centros de consumo.

La empresa estatal de energía UTE es el principal actor del sector, generando y comprando electricidad a productores privados, y siendo responsable exclusivo de la transmisión y distribución. Los contratos celebrados con entidades privadas cuentan con la garantía implícita del Estado y, en la práctica, UTE fue ejecutor de las políticas públicas que permitieron la diversificación de la matriz energética. Tres conexiones con Argentina y dos con Brasil permiten a Uruguay intercambiar electricidad con países vecinos. En 2019 y 2021, la exportación de energía superó los 2.800 GWh, lo que supone alrededor del 20% de la generación total. A su vez, desde fines de 2017 el país permite al sector privado exportar electricidad hacia Argentina. Según el Índice de Competitividad Global del Foro Económico Mundial, Uruguay ocupa el primer lugar en América Latina en cuanto a la calidad del suministro eléctrico en el país.

Además, en noviembre de 2022, UTE recibió por tercera vez el "Premio de Oro 2022" otorgado por la Comisión de Integración Energética Regional (CIER) ([Uruguay XXI](#)).

La capacidad instalada de generación eléctrica del país, a fines de 2023, era de 4.929 MW aproximadamente. Los parques eólicos instalados en la última década (más de 40) representan 1.517 MW, lo que equivale al 31% de la capacidad total, prácticamente igualando a la capacidad instalada de energía hidroeléctrica (1538 MW). Dentro de la capacidad instalada de eólica, 1.000 MW corresponden a generadores privados y 500 MW a parques eólicos de propiedad o administrados por UTE. Las plantas de generación a partir de biomasa representan 417 MW (8%), las de energía solar fotovoltaica (más de 20 plantas) 280 MW (5%), y el resto de la capacidad instalada está cubierto por las plantas de generación térmica basada en combustibles fósiles con 1.177 MW (25%). En un año de lluvias normales, el 97% de la demanda eléctrica nacional es cubierta por energías renovables ([BEN, 2022](#)).

El Reglamento de Transmisión de Energía Eléctrica ([Decreto N°278/002](#)), establece en sus Anexos las condiciones técnicas para el buen desempeño del sistema. En particular, el Anexo IV (Desempeño mínimo del sistema) comprende las normas de diseño, los criterios de desempeño mínimo, los estudios, las características de la reserva, la regulación de frecuencia, el control de tensión y potencia reactiva, los esquemas de control suplementario, el arranque en negro y la operación en tiempo real.

Para las energías renovables en general, particularmente la eólica y solar, si bien no se han establecido Códigos de Red específicos a través de resoluciones o reglamentaciones del Regulador (URSEA) o del Ministerio de Industria y Energía (MIEM), la empresa eléctrica UTE, ha incluido diversos requisitos técnicos en los Convenios de Uso/Conexión que forman parte de los Contratos de compraventa de energía eléctrica.

A continuación, se listan las principales condiciones técnicas para la conexión:

- El o los transformadores de potencia que vinculan las unidades generadoras a la red del Transmisor serán tales que aíslen la componente homopolar.
- El Generador no energizará la Red de UTE cuando ésta se encuentra desenergizada.
- Frente a fallas en la red del Transmisor o aperturas del disyuntor de la instalación de enlace, el Generador dejará de energizar la red del Transmisor mediante un dispositivo de corte del Generador.
- En cualquier situación que el Generador pueda quedar funcionando en isla con parte de la red del Transmisor, el sistema de interconexión de la central deberá ser capaz de detectar el funcionamiento en isla y cesar de energizar dicha parte de la red.
- Las unidades generadoras deberán estar diseñadas para una frecuencia nominal del sistema de 50 Hz, y permanecer conectada al SIN, ante la ocurrencia de eventos de frecuencia en el rango entre 49 y 51 Hz.
- El Generador debe contar con sistemas de control que permitan tanto ajustar la generación de reactiva en función de la potencia activa en régimen, como controlar la tensión en el Nodo de Conexión.
- El Generador debe poder conectarse en paralelo sin causar en el Nodo de Conexión fluctuaciones de tensión mayores al 5 % del nivel de tensión previo en el Nodo de Conexión.

- Para la puesta en paralelo del Generador es imprescindible que haya tensión estabilizada en el Nodo de Conexión.
- El Generador debe estar diseñado para operar en condiciones normales en el rango de tensión establecido en el Reglamento de Transmisión para la tensión nominal de la red a la que se conecta.
- Las unidades generadoras deberán como mínimo poder absorber o inyectar potencia reactiva en función de la potencia activa generada de acuerdo a la curva P,Q especificada.
- El Generador se compromete a entregar en régimen toda la potencia reactiva de su curva de capacidad.
- Hasta la fijación por parte del Regulador (URSEA) de los límites aceptables, el componente de armónicos de corriente inyectada a la Red del Transmisor no podrá superar los valores establecidos en IEEE519-1992.
- No podrá sobrepasarse los niveles máximos de emisión de *flicker* (fluctuaciones rápidas de tensión) de corta duración $Pst=0.35$ y de larga duración $Plt=0.25$ (IEC61000-3-7), tanto para operaciones de conexión como por funcionamiento continuo (para la totalidad del parque).
- El Generador se deberá mantener conectado a la red del Transmisor sin sufrir desconexión por causa de los huecos de tensión en el Nodo de Conexión, producidos por cortocircuitos trifásicos, de dos fases a tierra o una fase a tierra, con perfiles de magnitud y duración por encima de una curva tensión–tiempo establecida en el convenio.

Para verificar el cumplimiento de las condiciones técnicas establecidas, el convenio exige la realización de los siguientes ensayos: verificaciones e inspecciones rutinarias; registro de parámetros de calidad de onda como flicker, armónicos, huecos y variaciones de tensiones por conexiones individuales; ensayo de la medida de la variación de tensión en el arranque; ensayo de funcionalidad de cese de energización; ensayo de respuesta a condiciones anormales de voltaje; y ensayo de respuesta a condiciones anormales de frecuencia.

Otro aspecto contemplado en el convenio es la compensación del Transmisor hacia el Generador si las indisponibilidades en la red superan los valores límite establecidos. Para determinar esta compensación se utiliza el indicador de tiempo total de indisponibilidad en el Nodo de Conexión en el semestre.

La expansión de la red de transmisión debe realizarse de acuerdo con lo establecido en el Reglamento de Transmisión de Energía Eléctrica (Decreto N°78/002), Sección IV. En particular, el Regulador debe aprobar anualmente un Plan de Expansión del Sistema de Transmisión, cuyo objetivo es la identificación de las expansiones necesarias del Sistema de Transmisión, que permitan asegurar la satisfacción de la demanda con las centrales en servicio o cuyo ingreso se prevé. Esta expansión debe ser un resultado del Plan de Expansión y de las ampliaciones solicitadas por los usuarios mediante el procedimiento establecido en el Reglamento.

En los procedimientos para la elaboración de este Plan, deben participar el Transmisor (UTE), el administrador y operador del Mercado (ADME) y el Regulador (URSEA). Si bien este Reglamento está vigente desde 2002, aún no se ha aplicado y las expansiones de la red vienen realizándose según el plan de UTE.

4. Documentación relativa a energía del mar en Uruguay

Uruguay		
Num	Nombre del documento	Contenido del documento
1	Wave and tidal energy resource assessment in Uruguayan shelf seas (Alonso et al. 2017)	Estudio sobre el potencial undimotriz y de corrientes de marea en Uruguay.
2	Energías Renovables en Uruguay, noviembre 2023 (Uruguay XXI)	Informe sobre situación actual y perspectivas futuras del sector eléctrico, con énfasis en fuentes de energía renovables
3	H2U Hoja de ruta del hidrógeno verde en Uruguay (MIEM)	Hoja de ruta del hidrógeno verde en Uruguay.
4	Presente y futuro de las energías renovables en Uruguay (OPP)	Historia, situación actual y propuesta de estrategia para el desarrollo de las renovables al 2050 en Uruguay.
5	Política energética 2005-2030 (MIEM)	Planificación de la política energética 2005-2030
6	Convenio de uso tipo Uruguay (UTE)	Convenio tipo entre el Generador y UTE, donde se establecen los requisitos técnicos para el contrato de uso/conexión a la red.
7	Balance Energético Nacional (MIEM)	Estudio estadístico que reúne la información de los diferentes flujos de energía. Comprende la oferta, transformación y consumo sectorial de energía, expresada en una unidad común y referida a un año calendario.
8	Wave energy resource assessment in Uruguay (Alonso et al. 2015)	Estudio sobre el potencial undimotriz en la costa de Uruguay.

5. Conclusiones finales y recomendaciones

El pujante sector de energías renovables de Uruguay ha posicionado al país como referente mundial en energías verdes. Debido al espacio disponible para más parques eólicos y solares en tierra y probablemente por la falta de vocación marítima en el país, el sector no ha considerado al mar como un entorno donde expandirse. Sin embargo, el reciente interés por el hidrógeno verde hizo que el sector mirara por primera vez al mar, abriendo una ventana de oportunidad para las energías marinas.

Uruguay tiene un significativo potencial para la energía undimotriz, especialmente en la costa Atlántica, donde se estima una potencia media de 30 kW/m a 200 km de la costa, que se reduce a 20 kW/m a 70 km y alcanza entre 9 y 13 kW/m en proximidades costeras. Este potencial es considerable, ya que podría duplicar la demanda promedio anual de energía eléctrica del país si se aprovecha a lo largo de toda la costa. Además, la energía undimotriz en estas áreas destaca por su baja variabilidad interanual y estacional, lo que la convierte en una opción atractiva para diversificar la matriz energética. Recientemente se ha comenzado a explorar el potencial eólico offshore, con resultados preliminares promisorios. Sería interesante estudiar la complementariedad de sistemas de generación undimotriz y eólica offshore.

El país cuenta con una red eléctrica robusta, que ha demostrado ser eficiente en la integración de energías de fuentes renovables. Esto, sumado a la posibilidad de expandir las conexiones internacionales con Argentina y Brasil, posiciona al país para intercambiar excedentes de generación de energía, incluyendo la generada en el mar. La normativa vigente, aunque no específica para energías marinas, ya establece ciertos requisitos técnicos que podrían facilitar su incorporación.

La experiencia acumulada en actividades vinculadas con el entorno marino en Uruguay es acotada, como la operación de infraestructuras y servicios marítimos, por lo que será necesario fortalecer las actividades y generar nuevas capacidades a través de investigación y colaboración intersectorial para lograr desarrollar el sector. El desarrollo de estas capacidades técnicas, junto con la infraestructura portuaria existente, las instalaciones de ensayo y los conocimientos especializados que podrían ser adaptados para la investigación y desarrollo de tecnologías offshore, ofrecerían una base sólida para comenzar a explorar el potencial de las energías marinas en el país, teniendo en cuenta además que se dispone de un entorno normativo flexible y una red eléctrica moderna preparada para la integración de energías renovables.

Recomendaciones generales para fortalecer el desarrollo de las energías marinas en Uruguay:

1. **Desarrollo de un Marco Regulatorio:** crear un marco normativo específico para las energías marinas que incentive la inversión, promueva la investigación y garantice la sostenibilidad ambiental.
2. **Fortalecimiento de la Investigación y Desarrollo (I+D):** impulsar la investigación aplicada en tecnologías de energías marinas (eólica offshore, energía undimotriz, corrientes, etc.) adaptadas a las condiciones locales.
3. **Desarrollo de Infraestructura Portuaria y Logística:** adaptar la infraestructura portuaria y logística nacional para apoyar la instalación y mantenimiento de proyectos de energías marinas.
4. **Capacitación y Desarrollo de Capital Humano:** desarrollar una fuerza laboral capacitada en el diseño, operación y mantenimiento de proyectos de energías marinas.
5. **Fomento de Proyectos Piloto y Demostrativos:** implementar proyectos piloto para demostrar la viabilidad técnica y económica de las tecnologías de energías marinas en Uruguay.
6. **Atraer Inversiones Internacionales:** posicionar a Uruguay como un país atractivo para la inversión en energías marinas a nivel regional e internacional.
7. **Monitoreo y Protección Ambiental:** garantizar que el desarrollo de energías marinas se realice de manera sostenible, minimizando impactos negativos en el ecosistema marino.

Instituciones integrantes.



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

**UTN
FRCH**

FACULTAD REGIONAL CHUBUT



UFRJ
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO

UNIFEI
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ



CEMarin
Corporation Center of Excellence
in Marine Sciences



UN
UNIVERSIDAD
DEL NORTE



**ESCOLA
POLITÉCNICA
NACIONAL**



Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

ULPGC
Universidad de
Las Palmas de
Gran Canaria



CEMIE-Océano

CICESE



UTP

Universidad
Tecnológica
del Perú



WavEC
Offshore Renewables



**UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY**