

# TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE PARA CHILE PERSPECTIVAS Y DESAFÍOS



Universidad Austral de Chile  
*Conocimiento y Naturaleza*

# Tecnologías de Energía Eólica Offshore para Chile Perspectivas y Desafíos

**Publicado por:**

**Centro MERIC**

Avenida J. Escrivá de Balaguer 13105  
Oficina 1011, piso 10  
Lo Barnechea, Chile  
www.meric.cl

**Universidad Austral de Chile**

Canal de Ensayos Hidrodinámicos  
General Lagos 2086, Edificio 100, Campus Miraflores  
Valdivia, Región de Los Ríos  
www.uach.cl

**Autores Principales**

Gonzalo Tampier Brockhaus  
Cristian Cifuentes Salazar  
Natalia Aziaras Aguayo  
Rosana Cárdenas Cartes  
Katherine Álvarez Castillo

**Redacción:**

Alejandra Pérez Pavez

**Diseño y Diagramación:**

Shirley Burgos Martínez

**Impresión:**

Imprenta Austral

**ISBN:**

978-956-416-741-1

Valdivia, Chile, enero 2024

# Introducción

La energía eólica offshore es una fuente de energía renovable con gran potencial a nivel mundial, presentando en los últimos años un fuerte desarrollo en Asia y Europa. Se espera que entre 2025-2030 ocurra un crecimiento de 15 a 21 gigawatts (GW) por año [1], gracias a la apertura y puesta en marcha de nuevos mercados como América, Oceanía y el continente asiático.

Esta fuente energética presenta una alta calidad de recurso eólico y una gran cantidad de áreas disponibles para su explotación. Si bien los costos monetarios de la energía eólica offshore aún son más altos respecto de otras fuentes de energía renovable en tierra, se proyectan importantes reducciones, lo que irá acompañado del desarrollo de economías de escala, innovaciones tecnológicas y manufactura en serie [2].

Actualmente, el sector eólico offshore utiliza mayoritariamente dispositivos fijos al fondo marino, instalados a profundidades inferiores a los 50 metros (m). Recientes innovaciones en dispositivos flotantes y que están próximos a entrar en fase comercial, han ampliado considerablemente eventuales zonas geográficas compatibles con este tipo de tecnologías, especialmente en países que no cuentan con una extensa plataforma continental, como es el caso de nuestro país.

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 [3].

Uno de los principales desafíos que se plantean para los próximos años es reducir los costos (CAPEX y OPEX) y mejorar las capacidades de manufactura, instalación y mantenimiento [4], con el objetivo de garantizar una reducción sostenida de los costos de generación energética. El gran potencial de economías de escala de esta industria y la innovación en los procesos de manufactura, instalación y mantenimiento permiten vislumbrar un camino de reducción de costos en el mediano y largo plazo.

Para aprovechar el recurso eólico offshore en Chile es necesario, además de una participación activa en el desarrollo de las tecnologías y su reducción de costos, abordar y resolver temáticas específicas, tales como aspectos ligados a la capacidad de manufactura y de servicios marítimos, y la creación de un marco regulatorio que impulse el desarrollo del sector en armonía con otros usos del territorio marítimo y borde costero.

El documento que aquí presentamos, fue construido en base a diversas investigaciones y a las experiencias adquiridas a lo largo de la ejecución del proyecto MERIC, buscando contribuir al desarrollo en materia energética y ser a su vez una guía útil que favorezca el desarrollo de la energía eólica offshore a nivel nacional.

Crédito: Aerovista Luchtfotografie, 2020





## 2. Panorama Internacional de la Energía Eólica Offshore

---





En los últimos años, el sector eólico offshore ha experimentado una importante expansión tanto geográfica como tecnológica.

A nivel geográfico, el sector ha pasado de estar concentrado en Europa, a experimentar un fuerte desarrollo en Asia y, más recientemente, en América del Norte y Oceanía. A nivel tecnológico, se observan importantes avances en cuanto a la capacidad de las turbinas y un creciente interés por la tecnología eólica flotante que permite, de manera complementaria a las tecnologías fijas al fondo, utilizar espacios marítimos previamente inaccesibles.

### CAPACIDAD INSTALADA POR REGIÓN

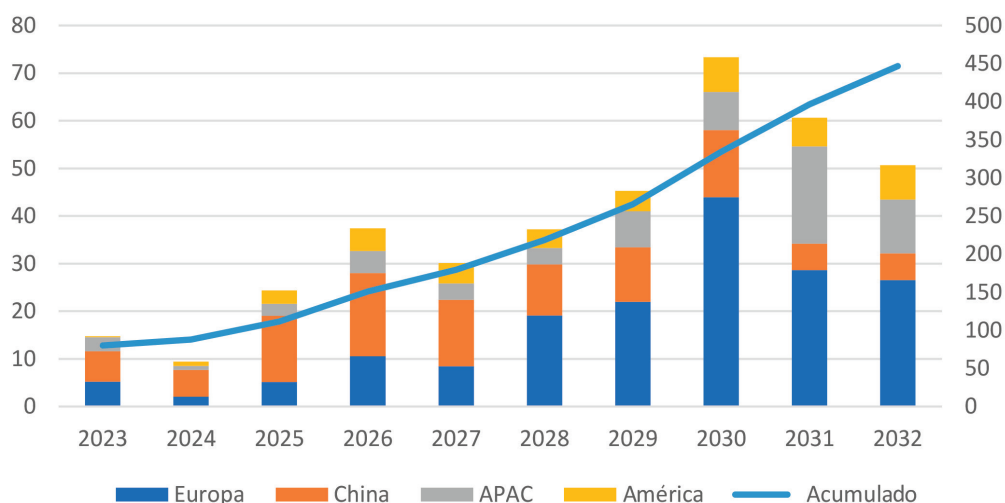


Fig. 1: Proyección de capacidad instalada a nivel global (GW). Fuente: Westwood Global Energy Group (2023) [5]. (Elaboración propia).

De acuerdo a la información recopilada por Westwood Global Energy Group (Fig.1) [5] las proyecciones del sector prevén que la capacidad instalada aumente en un 700%, pasando de 63 GW en 2022 a cerca de 450 GW en 2032. De este total, se espera que alrededor del 6% sea del tipo flotante, porcentaje que continuará aumentando en las próximas décadas. A nivel regional (América Central y del Sur), se observa un creciente interés por este tipo de energía, particularmente en Brasil, Colombia [6] y México [7], y de los cuales el primero cuenta con un mayor grado de avance en propuestas ingresadas en su sistema de evaluación ambiental por más de 171 GW [8].

Un estudio del Banco Mundial [9] identifica en Latinoamérica un potencial técnico de más de 7100 GW de energía eólica offshore, siendo Argentina, Brasil, Chile y México los 4 países con mayor potencial. Particularmente los casos de Argentina y Chile contemplan más de 1800 GW y 950 GW, respectivamente. No obstante, aún no existen políticas y/o estrategias relacionadas a esta fuente de energía, lo que en el caso chileno llama la atención considerando sus políticas públicas altamente favorables para el desarrollo de las energías renovables en general.

### 3. Energía Eólica Offshore en Chile: Oportunidades y Desafíos

---

Para la implementación de tecnologías de energía eólica offshore a escala comercial, existen diversos aspectos claves que tienen implicancias tanto a nivel técnico como económico y que pueden generar diversos riesgos para el correcto desarrollo de un proyecto de este tipo. Los aspectos que se presentan en esta sección están relacionados con el recurso eólico, la batimetría y las condiciones ambientales tanto operacionales como extremas. También, aspectos regulatorios, ambientales, sociales y otros de carácter técnico relacionados a la capacidad de manufactura, instalación y mantenimiento.



## 3.1 Recurso

Según información proporcionada por el Banco Mundial, Chile se posiciona como una zona de alto potencial para el desarrollo de proyectos eólicos a nivel global (Fig. 2).

En nuestro país, la energía eólica en tierra ha logrado posicionarse como una fuente renovable fundamental para lograr la descarbonización de la matriz eléctrica, alcanzando en septiembre de 2023 una capacidad instalada de 4605 megawatts (MW), lo que equivale a un 13.1% del total, sólo superada por la energía solar fotovoltaica (26%) y el gas natural (14%) [10]. Si bien, esto es un indicador del alto potencial eólico existente, al revisar la distribución geográfica de estas instalaciones, vemos que se concentran principalmente en la zona norte, con 2749 MW entre las regiones de Antofagasta a Coquimbo, y la zona centro sur, con 1388 MW en las regiones del Biobío y Araucanía. Y es que como se menciona en el informe emitido por el Ministerio de Energía y el ente técnico alemán GIZ [11], el potencial disponible disminuye significativamente al considerar restricciones territoriales (pendiente del terreno, cercanía a zonas urbanas, entre otras) y técnicas (factor de planta óptimo y transmisión eléctrica). En ese contexto, y tomando en cuenta los más de 4000 kilómetros (km) de costa, el panorama nos invita a poner atención al potencial allí existente.

Frente a las costas chilenas los vientos superficiales están determinados a gran escala por la presencia tanto del Anticiclón del Pacífico Sur que favorece el arribo de los vientos del sur en la costa de las zonas norte y centro, como el cinturón de bajas presiones que genera circulación ciclónica en las latitudes medias. Estos vientos que fluyen sobre el mar sin barrera alguna presentan mayor potencial que en tierra. Según el estudio Mattar & Borvorán (2016) [12] donde se muestran los resultados de la primera estimación del recurso eólico offshore para la zona central de Chile, existe un potencial cercano a los 30 gigawatt-hora (GWh) de generación anual y un factor de planta mayor al 40% para una turbina referencial de 8 MW.

A pesar de lo prometedor de este recurso, al realizar un estado del arte sobre la energía eólica offshore en Chile, es posible observar lo poco explorado que ha sido este tema, con solo algunos trabajos que hacen referencia al potencial existente y su desarrollo [3, 12-16]. Entre ellos destaca el estudio Mattar & Guzmán (2017) [13] donde se analiza la factibilidad tecno-económica de la energía eólica offshore en nuestro país, y resaltan la zona entre 30° y 32°S debido al balance entre la densidad de potencia y las condiciones técnicas de factor de planta y desempeño, que la convierten en un sitio de interés a considerar.

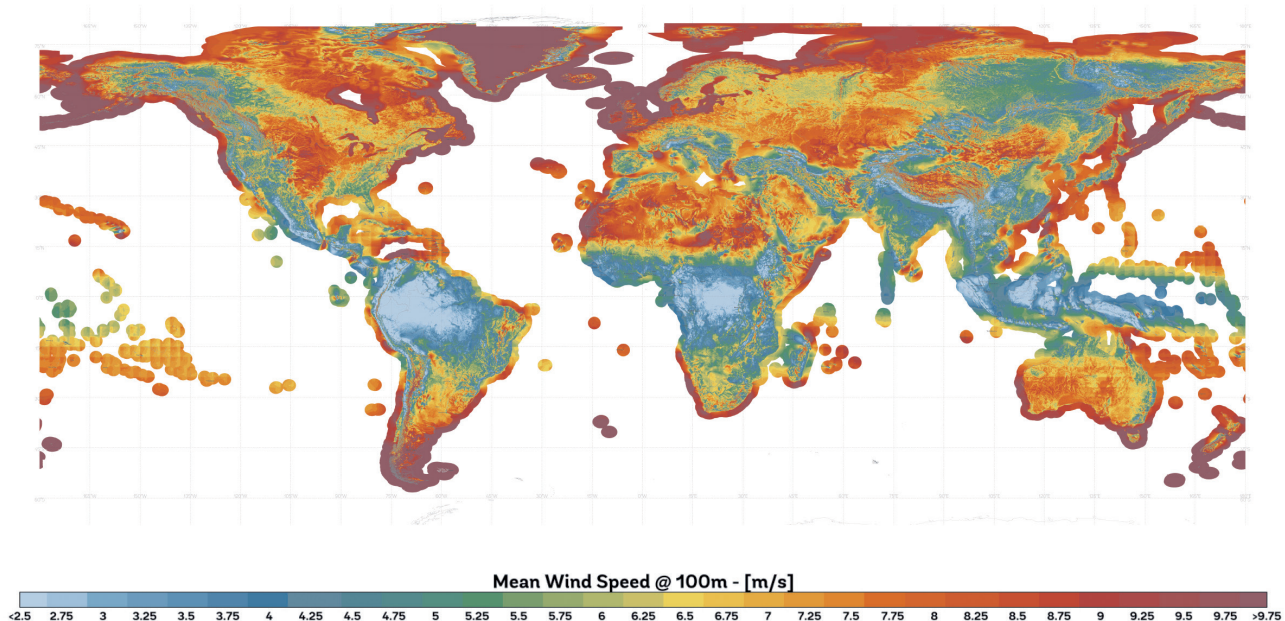


Fig. 2: Potencial eólico a nivel global. Fuente: World Bank (2020)



## 3.2 Condiciones Operacionales y Extremas

Para el desarrollo de un proyecto de energía eólica offshore, junto con caracterizar detalladamente el recurso eólico, es necesario describir las condiciones del mar, ya que tienen un fuerte impacto en el diseño de la fundación, en el caso de las tecnologías fijas al fondo, y de la plataforma con sus sistemas de fondeo, en el caso de las tecnologías flotantes.

Las condiciones de mar extremas asociadas habitualmente a períodos de retorno de 50 o 100 años, tienen un fuerte impacto en el dimensionamiento estructural. Por su parte, las condiciones de mar operacional, esto es, el conjunto de estados de mar representativos para la mayor parte de la vida útil del proyecto, impactan, además de la generación de energía, el dimensionamiento estructural (específicamente en el análisis de fatiga) y en el diseño de las operaciones de instalación y mantenimiento, las que a su vez repercuten en el factor de disponibilidad (porcentaje de tiempo en que la planta está operativa).

En proyectos de energía marina, los costos de mantenimiento pueden exceder el 20% del costo total del proyecto [17] y se ven afectados por las condiciones operacionales del sitio escogido y los tipos de embarcación utilizados. El reporte Offshore Wind Access Report 2022 [18] concluye que hay una gran variedad de embarcaciones de transferencia (Crew Transfer Vessels - CTV's) usados para tareas de operación y mantenimiento (O&M) en parques eólicos offshore, que permiten acceder en estados de mar con alturas de ola significativa de hasta 1.5 - 2 m.

Así, el porcentaje de ocurrencia de los estados de mar en los que es posible realizar O&M es un factor importante a evaluar, porque afecta directamente la disponibilidad de planta y por ende, el costo final de la energía [19].

Para ejemplificar, se han seleccionado cuatro sitios referenciales: dos en Europa y dos en Chile:

- Mar Céltico, frente a la costa suroeste de Inglaterra (50.8°N, 7°W)
- Océano Atlántico, frente a las costas del centro de Portugal (39°N, 9.8°O)
- Océano Pacífico, frente a la ciudad de Valparaíso, Chile (33.6°S, 71.8°W)
- Océano Pacífico, frente a la ciudad de Concepción, Chile (37°S, 73.6°W)

En la Fig.3 se muestra, para cada uno de estos sitios referenciales, los porcentajes de ocurrencia de alturas significativas menores a 2.5, 2.0, 1.5 y 1.0 m. Por ejemplo: si se necesita realizar una mantención que requiere una altura significativa menor a 1.5 m, se puede ver que en los sitios referenciales frente a Inglaterra y Portugal existe un marcado ciclo estacional, con porcentajes de ocurrencia mayores al 50% en los meses estivales. Mientras que los sitios en Chile muestran una baja estacionalidad. En el sitio frente a Valparaíso se observa que el porcentaje de ocurrencia de alturas significativas inferiores a 1.5 m es cercano al 30% durante todo el año, mientras que en Concepción, este valor se reduce a menos del 20%.

En base a este análisis se puede inferir que las operaciones de mantenimiento de turbinas eólicas offshore en Chile requerirán de tiempos de espera mayores que en otras partes del mundo, o que será necesario el desarrollo de tecnologías y capacidades acordes a estas condiciones ambientales.

Adicionalmente, la presencia de marejadas en Chile ha ido en aumento generalizado a lo largo de todo el país [20], además del incremento en intensidad y frecuencia durante las últimas décadas. Si a mediados del siglo pasado ocurrieron 5 eventos extremos al año, hoy en día hay 20 al año, incluso en los meses de verano [20-23]. La tendencia al aumento de la altura significativa de ola entre 1980 y 2015 es del 10-20% (0.1 - 0.4 m) [22, 23], mientras que las alturas significativas de olas extremas mostraron una tendencia al aumento de 0.01 metros por año (m/año) entre 1985

y 2018 [24]. Asimismo, la media histórica para un periodo de retorno de 100 años es de 3.4 m (1985-2004), en cambio, para la proyección entre 2026 y 2045, es de 4.8 m, lo que representa un aumento del 41%. Un ejemplo de estos eventos extremos fue la tormenta de 2015, que dejó daños considerables en Coquimbo, Viña del Mar y Valparaíso, con pérdidas de al menos US\$1.862.000. La altura de ola significativa máxima que se alcanzó a registrar fue de 7.23 m, y además se generó impacto en la morfología costera, como erosión de playas, socavones y retroceso de la línea de costa [25].

Los factores mencionados anteriormente son puntos claves a considerar al momento de analizar potenciales sitios para el desarrollo de la energía marina en Chile, debido a que generan un impacto en los costos, tiempos de espera, accesibilidad, entre otros.

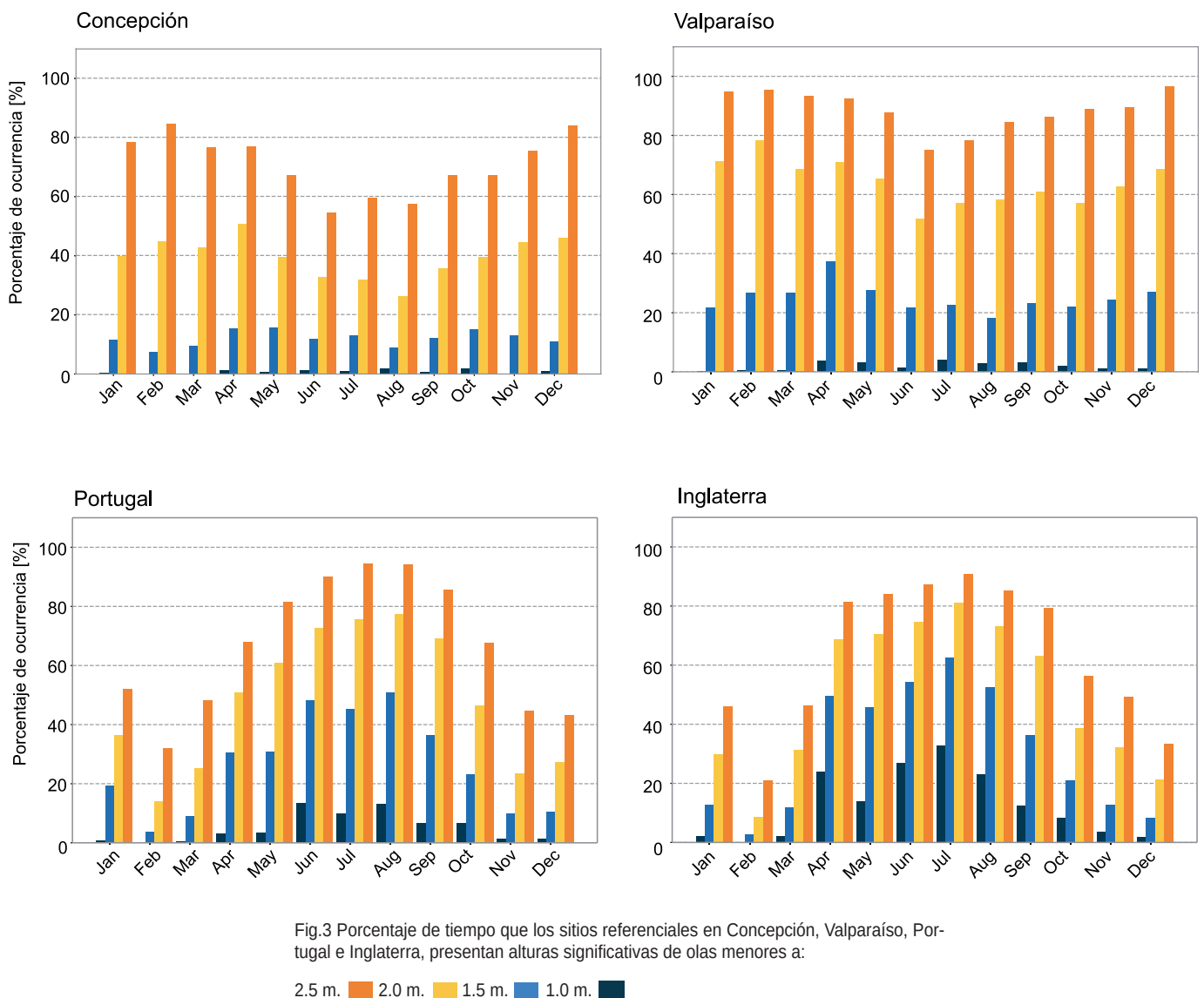


Fig.3 Porcentaje de tiempo que los sitios referenciales en Concepción, Valparaíso, Portugal e Inglaterra, presentan alturas significativas de olas menores a:

2.5 m. 2.0 m. 1.5 m. 1.0 m. 0.5 m.

## 3.3 Batimetría

El desarrollo de la industria eólica offshore necesita situarse dentro de un rango de profundidades específicas que permitan la viabilidad técnica y económica del proyecto (Fig. 4). Para las turbinas offshore fijas al fondo, se considera una profundidad máxima de alrededor de 50 m para que el proyecto sea viable económicamente. A partir de esa profundidad es factible la instalación de turbinas eólicas flotantes, aunque algunas de estas tecnologías requieren de profundidades mínimas aún mayores. En cuanto al límite máximo, se espera que estos dispositivos flotantes puedan ser instalados en aguas de hasta 800 o 1000 m, aunque a la fecha el proyecto ubicado a mayor profundidad alcanza los 300 m (Hywind Tampen en Noruega).

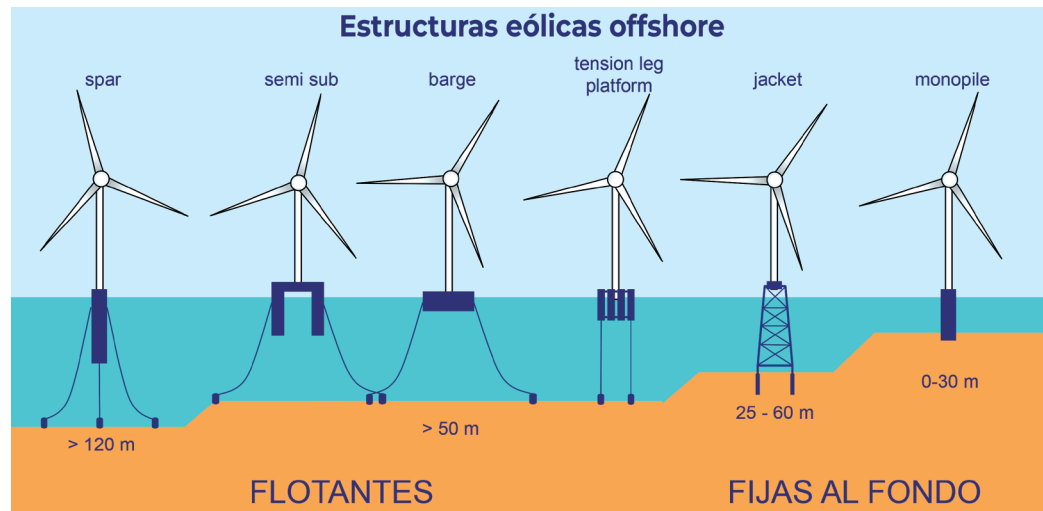


Fig. 4: Estructuras eólicas offshore y profundidades típicas de instalación. (Elaboración Propia).

La plataforma continental es la prolongación natural del territorio que se extiende bajo el mar y se caracteriza por ser relativamente plana. La gran extensión de la plataforma continental en el norte de Europa, junto al potencial eólico existente en esa zona, ha permitido el pujante desarrollo de la industria eólica offshore, utilizando mayoritariamente turbinas fijas al fondo debido a las bajas profundidades del lugar.

Pero a diferencia de las óptimas condiciones existentes en la región europea y en otros lugares del mundo (p. ej., China, la costa Este de Estados Unidos, Brasil y Corea), Chile presenta una batimetría muy diferente. A pesar de nuestro vasto territorio marítimo, las profundidades aumentan rápidamente al alejarnos de la costa (Fig. 5).

Desde los 33°S hacia el norte, nuestra plataforma continental es casi inexistente [27], mientras que entre 33°S y 43°S presenta una anchura media de entre 30 a 40 km, siendo las zonas con mayor extensión las localizadas frente a la Isla Mocha (región del Biobío) y la Isla de Chiloé (~60 km). Esta macrozona, que abarca desde la región de Valparaíso a Los Lagos, alcanza profundidades máximas de entre 150 a 300 m [28]. Más allá del límite de la plataforma, el relieve cae con una mayor pendiente llegando hasta 8000 m de profundidad en la fosa oceánica.

En este contexto, pese a tales desventajas comparativas, las características de la zona centro-sur de Chile presentan condiciones interesantes de estudiar para el futuro desarrollo de la industria eólica offshore.

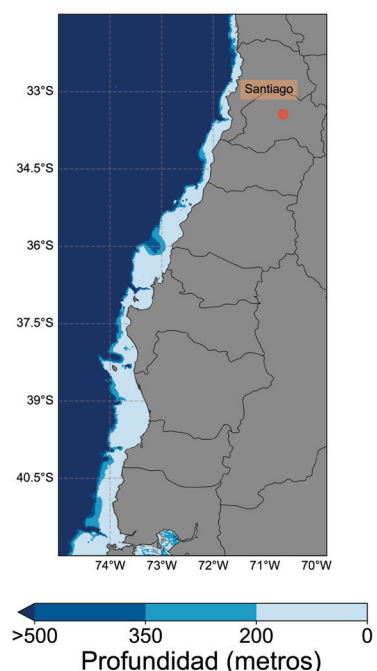


Fig. 5: Plataforma continental de Chile desde Arica a Chiloé. Datos extraídos de GEBCO [26]



## 3.4 Consideraciones Ambientales y Sociales

### Impacto ambiental

El impacto ambiental que conlleva el desarrollo de la industria eólica offshore así como de cualquier proceso productivo, necesita ser estudiado para establecer normativas que permitan minimizarlo y/o mitigarlo. En el reciente estudio Galparsoro et al. (2022) [29] se han sintetizado las interacciones existentes entre las turbinas eólicas y los ecosistemas marinos.

Entre los impactos negativos moderados/altos está el daño que generan las turbinas en aves y mamíferos marinos, como mortalidad y desplazamiento, y en la estructura de los ecosistemas.

Por otro lado, se hace mención a ciertos impactos positivos como es la utilización de las estructuras por parte de especies marinas simulando arrecifes artificiales y la mitigación de los impactos de la pesca de arrastre por su prohibición en zonas cercanas a las instalaciones debido a motivos de seguridad.

Como se recalca en esta investigación, los impactos ambientales tienen variabilidad espacial, o sea, varían de un sitio a otro según las condiciones allí existentes. Por ende, el desarrollo de la industria eólica offshore en Chile necesitará estudios locales y monitoreos directos que permitan conocer a mayor profundidad los ecosistemas marinos y lo que podrían enfrentar.

### Impacto visual

Otro aspecto que es importante considerar previo a la elección de un sitio para el emplazamiento de un proyecto de energía eólica offshore, es el impacto visual.

En países donde la industria eólica offshore está más avanzada, la ubicación cercana a la costa de las instalaciones ha generado rechazo pues generan perturbación del paisaje. Si bien, el impacto visual es subjetivo, y por lo mismo es difícil de cuantificar por estar sujeto a la emocionalidad de las personas, se han realizado estudios que sugieren algunas consideraciones para mejorar la aceptabilidad de la población.

En la investigación Mishima & Mishima (2023) [30] se concluye que la ubicación espacial de las turbinas con una configuración más simétrica generaría mayor aceptación. Igualmente el trabajo Sullivan et al. (2013) [31] plantea que turbinas con altura de buje entre 67 a 90 m. ubicadas a más de 40 km de la costa solo son visibles si uno se concentra en ellas; a distancias cercanas a 29 km son perceptibles a la visión de manera ocasional; y, a menos de 16 km se convierten en un foco de atención visual importante.

En este caso, para el emplazamiento de proyectos eólicos offshore en Chile sería beneficioso considerar distancias lejanas a la costa que generen menor incomodidad visual en la ciudadanía.

### Múltiples usos del espacio marítimo

Otra consideración a tener en cuenta es el uso múltiple del espacio marítimo, ya que en nuestro 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 [32, 33]. 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 [34].

En el contexto internacional, en mares europeos con gran desarrollo de energía eólica offshore se han identificado conflictos con la industria pesquera, especialmente con la pesca de arrastre, debido al desplazamiento de sus faenas y sus consecuencias económicas. Y con las proyecciones de expansión de la industria eólica marina se prevé un aumento importante de hechos como estos a largo plazo, si es que no se toman acciones que permitan la coexistencia de ambas actividades [35].

## 3.5 Capacidades de Manufactura, Instalación y Mantenimiento

Para asegurar la viabilidad técnica y económica de futuros proyectos de energía eólica offshore en Chile es necesario que parte importante de la fabricación de las estructuras sea realizada en nuestro país. Asimismo, es necesario asegurar que las labores de instalación, mantenimiento y desmantelamiento puedan ser realizadas con la infraestructura y el equipamiento disponible en Chile o, alternativamente, considerar economías de escala que permitan incorporar estos equipos o esta infraestructura en el largo plazo.

La fabricación, instalación, operación, mantenimiento y desmantelamiento de una plataforma eólica flotante o de una granja se puede resumir en el siguiente diagrama (Fig. 6):

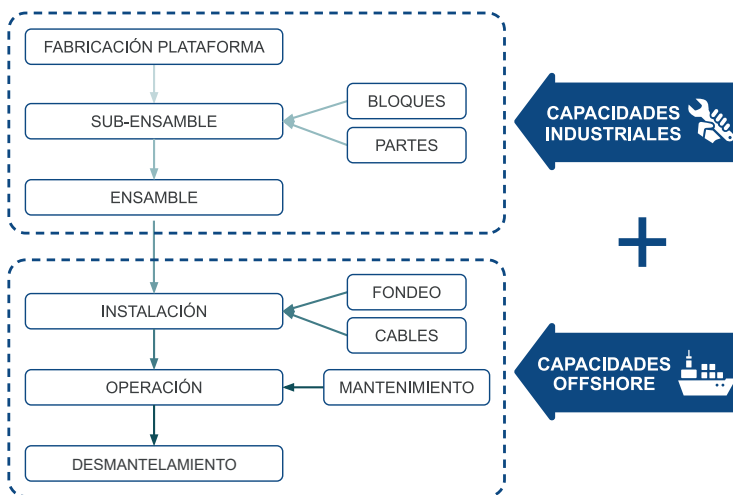


Fig.6: Diagrama de fabricación, instalación, operación, mantenimiento y desmantelamiento de una plataforma eólica flotante. (Elaboración Propia)

Debido al diseño, dimensiones y masa, se considera que la fabricación, el montaje y la integración de los principales elementos suponen un desafío mayor para los astilleros nacionales, aunque esto podría requerir de un análisis caso a caso.

Si bien se puede considerar que las instalaciones y gran parte de la cadena de suministro requerida existe actualmente en el ámbito de la construcción naval, es posible que no existan las capacidades de levante, maniobra y lanzamiento de plataformas de gran tamaño.

En cuanto a las operaciones marinas de instalación, mantenimiento y desmantelamiento, se estima que pueden suponer un desafío complejo. Realizar mantenimiento en el medio marino puede ser costoso, requerir mucho tiempo y presentar muchos riesgos [36]. En una plataforma eólica offshore, existen múltiples componentes que requerirán mantenimiento e inspección regular, por lo que es importante contar con medios de acceso seguros y efectivos. Para estos fines, existen embarcaciones especializadas, además de medios de transferencia de personal y carga que minimizan el riesgo de esta crítica operación. Considerando que las operaciones marinas tienen un fuerte impacto sobre la inversión total en un proyecto de estas características, es crucial su consideración a la hora de evaluar la viabilidad de una tecnología para su aplicación en Chile.

A partir de un análisis de las diversas tecnologías disponibles en la actualidad y de la infraestructura y el equipamiento disponible en Chile, se identificaron los siguientes aspectos clave en la instalación, el mantenimiento y el desmantelamiento de los sistemas:

## Requerimientos de levante y movilización de los dispositivos

Debido al tamaño de la mayoría de las plataformas eólicas flotantes (mayores a las embarcaciones y artefactos navales construidos en Chile, particularmente en su ancho), se considera que existen importantes limitaciones para el levante y movimiento en tierra de estas estructuras, restringiendo la cantidad de ubicaciones en las que se podrían montar dispositivos de este tipo. Estas limitaciones están tanto en la infraestructura (patios de fabricación, gradas de lanzamiento) como en el equipamiento necesario (grúas y sistemas de transporte pesado).

En cuanto a la disponibilidad de opciones de transporte en mar, las alternativas son reducidas. Chile no cuenta con embarcaciones especiales tales como Heavy Lift Ships o Anchor Handling Tug Supply (AHTS) vessels, utilizados normalmente para operaciones de transporte de elementos de gran tamaño sobre cubierta, por lo que las opciones se limitan únicamente al uso de pontones o barcasas o al remolque, con las respectivas limitaciones que eso implica. En cuanto a las operaciones de levante en el mar, las opciones se limitan a una única grúa flotante ("Yagana", con 350 toneladas de capacidad de levante) y pontones sobre los cuales se pueden instalar grúas móviles terrestres de menor tamaño. Considerando además que ninguna de estas opciones ha sido diseñada para realizar operaciones bajo las condiciones típicas que se encuentran en mar abierto frente a las costas chilenas, la espera de ventanas climáticas acordes podrían limitar o retrasar significativamente estas operaciones.

Debido a lo anterior, se considera que las tecnologías que no requieren de operaciones de levante en el agua ni de transporte sobre cubierta, por ejemplo: aquellas que pueden ser remolcadas a flote hacia el punto de instalación presentan una mayor compatibilidad con las condiciones presentes actualmente en Chile.

## Requerimientos para la instalación de plataformas y de sus elementos de fondeo

Un aspecto determinante para la instalación de plataformas y sus elementos de fondeo es la infraestructura de apoyo a las operaciones marinas. La selección del puerto base, la flota de apoyo disponible y el equipamiento de apoyo, deben ser apropiados y compatibles entre sí.

La selección debe contemplar aspectos como: el diseño de la plataforma, las características del fondo marino, las condiciones ambientales imperantes, y los métodos y estrategias de instalación disponibles.

Dependiendo de las capacidades y condiciones locales es recomendable tener una visión holística desde el comienzo del proyecto y durante toda la planificación operacional. Además al integrarlo con la selección de puerto, embarcaciones y equipamiento de apoyo, se pueden generar oportunidades significativas de reducción de costos.

Dependiendo del tipo de tecnología, los requerimientos para la instalación de la plataforma o de sus elementos de fondeo son altamente variables y están normados [37]. En el caso de plataformas con sistemas de fondeo convencionales (p.ej. mediante catenaria), los requerimientos de precisión en la ubicación de anclas y las operaciones de instalación habituales son compatibles con las embarcaciones de trabajo frecuentemente encontradas en Chile, como remolcadores, barcasas o pontones.

Para tecnologías que requieren de una alta precisión en la ubicación de sus componentes de anclaje, la práctica general es utilizar embarcaciones con sistemas DP (Posicionamiento Dinámico) de las que existen pocas unidades en Chile. Si este requerimiento está acoplado a una operación de levante, por ejemplo, de una base de gran tamaño para fijar el dispositivo al fondo marino, puede ser necesaria la intervención de embarcaciones de apoyo offshore (offshore supply vessels - OSVs) de gran tamaño, habitualmente disponibles en países en los que se realiza la explotación de hidrocarburos, lo que podría hacer económicamente inviable al proyecto.



Por lo tanto, se considera que las tecnologías que no requieren de un posicionamiento de alta precisión presentan una mayor compatibilidad con las condiciones presentes actualmente en Chile. En el mediano plazo, se considera igualmente factible la adaptación de embarcaciones o de maniobras para la instalación de elementos de tamaño reducido con una alta precisión, lo que además se podría aplicar de manera análoga en la industria acuícola.

### **Requerimientos para operaciones de mantenimiento**

En este análisis se identifican tres tipos de operaciones de mantenimiento: en tierra, puerto y sitio. El mantenimiento en tierra, también denominado “carena”, requiere capacidades similares a las de fabricación, lo que puede conllevar un alto costo.

Mientras que para mantenimientos mayores relacionados generalmente a la turbina - como el reemplazo de palas - el mantenimiento en puerto es una opción más sencilla, aunque demanda condiciones específicas en cuanto a la profundidad, las capacidades de levante en tierra y el acceso, pudiendo elevar los costos significativamente. Por estas razones, se observa como tendencia que muchos desarrolladores buscan minimizar estos tipos de mantenimiento, realizando la mayor parte en el sitio.

El mantenimiento en sitio puede estar relacionado a labores submarinas de baja complejidad como la inspección con ROVs (vehículos submarinos operados remotamente), hasta labores a gran profundidad o soldaduras que requieren de buzos especializados, implicando altos costos y riesgos. Asimismo, el mantenimiento en sitio necesita de labores de inspección y mantenimiento a bordo de la plataforma eólica, lo que a su vez, requerirá de una maniobra de transferencia de personal y/o de material, que implica un alto riesgo.

Existen diversas reglas y estándares que entregan guías para el diseño, planificación y ejecución de este tipo de operaciones marinas [38-40] en los que se establecen criterios técnicos y ambientales y cuya aplicación puede presentar desafíos considerando las condiciones típicas de oleaje y viento en Chile, así como las limitaciones que imponen las embarcaciones de apoyo y sistemas habitualmente disponibles. En este contexto, se considera que las plataformas que requieren de un mínimo mantenimiento en tierra (ejemplo: mediante la utilización de materiales como el concreto) presentan una mejor compatibilidad con las condiciones que se presentan en Chile. Igualmente, se considera de gran importancia un diseño holístico que incluya un adecuado diseño o selección de las embarcaciones y equipos de apoyo para esta labor.

Crédito: Rab Lawrence, 2018



## 3.6 Marco Normativo y Planificación del Espacio Marino

Para el desarrollo exitoso del sector eólico offshore en un determinado país, es necesario que exista un marco normativo adecuado que establezca límites y requerimientos para los desarrolladores, refleje la estrategia local de largo plazo en materia de energías renovables, y entregue certezas que incentiven las altas inversiones iniciales que se requieren en este tipo de proyectos. En países que tienen un sector eólico offshore desarrollado, se observa que todos ellos cuentan con un marco normativo específico para esta actividad que incluye: aspectos técnicos, ambientales y sociales, con una mirada estratégica no solo a una política energética, sino también a la planificación territorial.

Este marco normativo puede incluir múltiples elementos: leyes, planes nacionales, reglamentos y normas, que dan las condiciones para la obtención de permisos, como licitaciones de espacios marinos, agencias de gobierno especializadas, entre otros; inyección de energía a la red mediante tarifas reguladas, prioridad de compra u otras medidas, requisitos ambientales y sociales como leyes ambientales específicas a la actividad y más.

Dinamarca, Alemania, Países Bajos, Reino Unido, Bélgica, Francia y más recientemente China, Estados Unidos y Corea del Sur son países que cuentan con un marco normativo y una planificación de sus territorios marítimos y Zonas Económicas Exclusivas (ZEE), permitiendo a varios de ellos tener proyectos en operación, mientras que otros se encuentran desarrollando fuertemente la actividad. A nivel latinoamericano destacan Colombia, que ya ha presentado una estrategia de desarrollo, y Brasil, que cuenta con una planificación territorial y se encuentra próximo a presentar una ley para regular este sector [41].

En el caso de Chile, no existe a la fecha una regulación específica para el desarrollo de proyectos de energía eólica offshore. Si bien la legislación vigente está en línea con la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONVEMAR [42], ratificada por Chile en 1997), que otorga al Estado los derechos de soberanía para explorar, explotar, conservar y administrar los recursos naturales del mar territorial y de la ZEE, la falta de una normativa específica dificulta proyectar e incentivar la actividad a largo plazo.

La legislación nacional existente permite el desarrollo de proyectos de generación de energía al interior de una concesión marina, lo que limitaría la actividad al mar territorial. Como se mencionó anteriormente, este espacio es utilizado por la pesca artesanal, la acuicultura, el turismo, ECMPOs, entre otros. Por otra parte, la figura actual de concesiones marinas no permitiría al Estado una planificación de largo plazo, puesto que la selección de los sitios quedaría en manos de los desarrolladores, lo que dificulta la implementación de una zonificación adecuada y de economías de escala.

En la ZEE, Chile aún no cuenta con una normativa específica ni con una estrategia en el largo plazo, lo que se refleja en la ausencia de esta temática en el decreto que promulga el "Programa Oceánico Nacional", firmado en 2023 por el Ministro de Relaciones Exteriores [43]. Esta situación puede ralentizar el desarrollo del sector eólico offshore en el corto y mediano plazo, pero abre la oportunidad de la construcción de un marco normativo robusto en el largo plazo en el que se contemplen los objetivos de descarbonización asumidos por el Estado, y se aborden temáticas relevantes que impulsen la actividad bajo condiciones favorables para todas las partes.



## 4. Análisis de Potenciales Sitios y Aplicaciones en Chile

---

Esta sección tiene como objetivo recomendar, en un modo general, sitios que son interesantes de considerar en estudios tecno-económicos que busquen desarrollar la energía eólica offshore en Chile, los que debieran ser complementados con estudios de índole ambiental y social. Además, se expondrán algunas aplicaciones, adicionales a la inyección de energía a la red eléctrica, que pudieran tener un potencial de nicho en Chile. Para este análisis, se utilizó como base la información expuesta en la sección anterior, donde se exponen aspectos específicos a nuestro país y de su potencial eólico offshore.

El recurso eólico existente frente a las costas de Chile presenta buenas condiciones especialmente en la zona centro y sur, donde la velocidad promedio del viento es cercana a los 9 metros por segundo (m/s) a 100 m de altura (Fig.7, izquierda).

En cuanto a la batimetría, la zona norte no presenta profundidades que hagan viable el desarrollo de la industria eólica offshore a gran escala, debido a que la plataforma continental es casi inexistente. Pero a partir de la región de Valparaíso al sur las condiciones son propicias para estos proyectos por contar con una plataforma más extensa.

En el mapa de batimetría que muestra parte del territorio chileno (Fig. 7, derecha), se aprecian profundidades que van entre 0 y 250 m, teniendo mayor área las zonas entre 50 y 150 m, lo que favorece el uso de plataformas flotantes por sobre las fijas al fondo. En la misma figura, se delimita con una línea negra el mar territorial, que como bien se explicó anteriormente, es un área que cuenta con gran cantidad de concesiones otorgadas o en trámite, lo que en la actualidad podría generar dificultades al momento de pedir permisos para emplazar un proyecto o las líneas eléctricas hacia tierra.

La instalación de una granja eólica a menos de 16 km de la costa podría causar impacto visual, provocando conflictos de índole social, especialmente si es cercana a territorios habitados. Por este motivo, se recomienda como más idóneas las zonas de la plataforma continental ubicadas al oeste del límite del mar territorial (~ 19 km de la costa).

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 [45]. 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 ASENNAV en Valdivia (Los Ríos). Es importante considerar estas capacidades al momento de escoger potenciales sitios, debido a la necesidad de construir e integrar estructuras flotantes, embarcaciones especializadas, servicios marítimos y portuarios.

Otro aspecto relevante para disminuir costos al emplazar un proyecto eólico offshore, es que su ubicación se encuentre cercana a centros de consumo. Según la proyección de demanda para el año 2042, se estima que ésta ascenderá a 8.5 terawatts-hora (TWh) en la región de Valparaíso, 7.6 TWh en el Biobío y 1.6 TWh en Los Ríos [46].



En conclusión, estas tres regiones presentan gran potencial para el desarrollo de la industria eólica offshore al contar con buen recurso eólico, puertos y/o astilleros importantes, y centros de consumo cercano a la costa (Fig. 7). En cuanto a la batimetría, encontramos escasas áreas con profundidades compatibles con plataformas fijas al fondo, a la vez que se observan amplios sectores con profundidades compatibles con plataformas de tipo flotante, especialmente en las regiones del Biobío y los Ríos.

Finalmente, al considerar el desarrollo industrial y portuario, se observa que Bío Bío cuenta con la mayor compatibilidad para el desarrollo de esta industria en el mediano plazo, lo que podría ser alcanzado por Los Ríos en el largo plazo.

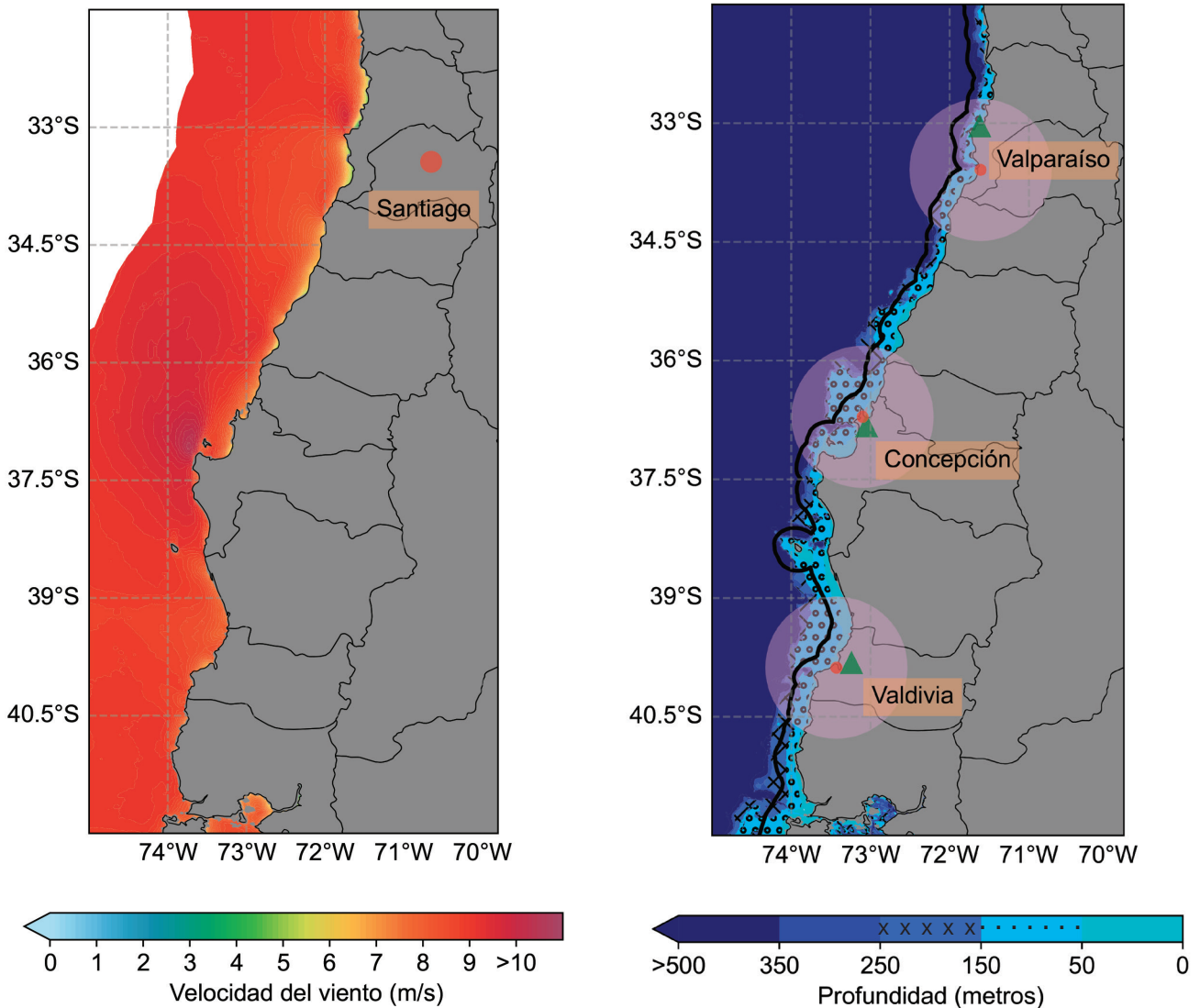


Fig. 7: Zona centro y sur de Chile con: (izquierda) campo de recurso eólico offshore. Datos extraídos de Global Wind Atlas [44], y (derecha) batimetría, límite de mar territorial (12 millas en línea negra), capitales regionales costeras (triángulo verde) y puertos cercanos con área de 100 km de radio (círculo rojo).



De manera complementaria al desarrollo de granjas eólicas offshore para la inyección de energía a la red eléctrica, Chile tiene interesantes aplicaciones de nicho, en las que se podrían integrar distintas actividades en el mar, tales como la acuicultura, la desalación y la producción de hidrógeno verde.

En el caso de la acuicultura, existe un marcado interés por desarrollar la acuicultura offshore o en zonas expuestas, lo que requiere de importantes innovaciones tecnológicas y mayores requerimientos de energía tanto en términos de cantidad como de autonomía [47].

En el caso de la desalación, la que toma cada vez mayor relevancia en Chile, y en especial -aunque no exclusivamente- en la zona norte, existe un creciente interés por utilizar fuentes de energía renovable, además de los primeros desarrollos de plantas de desalación flotantes que podrían ser integradas en parques eólicos offshore.

El desarrollo del hidrógeno verde en Chile es, quizás, el nicho de mayor potencial en el largo plazo, considerando que las primeras plantas flotantes integradas de energía eólica y de producción de hidrógeno ya se encuentran en desarrollo [48]. Si bien la integración de estas tecnologías aún está en una etapa muy inicial, su implementación en Chile podría reducir la presión sobre los proyectos eólicos onshore en la región de Magallanes y ampliar las capacidades de producción en las cercanías de centros de procesamiento y consumo.

## 5. Herramientas y Capacidades Desarrolladas por MERIC

---

En la búsqueda de generar capacidades para el desarrollo de la energías marinas en Chile, y en particular de la energía eólica offshore, el Centro MERIC junto al Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Universidad Austral de Chile (CEH-UACH) han elaborado herramientas y metodologías que aportan al conocimiento de estos proyectos y de las condiciones particulares que existen en nuestro país.

## 5.1 Adapt-ORE

Adapt-ORE es una herramienta desarrollada por el Centro MERIC a través de la Línea de Investigación “Adaptación de Tecnologías de Energía Renovable Marina a las Condiciones Locales en Chile”.

Se basa en un modelo de simulación de eventos discretos georreferenciado y en el dominio del tiempo, diseñado para evaluar el ciclo de vida de proyectos de energía renovable marina y comparar distintos sitios, tecnologías y estrategias de O&M. Adapt-ORE permite al usuario crear escenarios de proyectos ingresando parámetros ambientales (behind cast) y operacionales (criterios de cierre de puerto, etc) referente a los sitios, embarcaciones, puertos y dispositivos de interés, los cuales serán usados como input para evaluar el desempeño de los dispositivos en un sitio, entre otros indicadores relevantes.

Los tiempos de espera para acceder a reparar un dispositivo debido a condiciones ambientales no aptas para la navegación o la realización de las tareas de mantención, aumentan los tiempos de inactividad de una turbina, provocando un impacto directo en la generación de energía eléctrica, y por lo tanto en las ganancias económicas. Considerando que la realización de mantenciones está sujeta a límites ambientales y operacionales requeridos, y a las características de las embarcaciones y de los dispositivos involucrados, Adapt-ORE integra en la evaluación de los proyectos las características hidrodinámicas tanto de los dispositivos como de las embarcaciones, las que son obtenidas mediante experimentos a escala y simulaciones numéricas. Esto permite obtener curvas de operatividad para la embarcación, lo que definirá el estado de mar límite a la que puede operar en el momento de la mantención [49]. Como se muestra en el diagrama de flujo de Adapt-ORE (Fig.8), la factibilidad de zarpe y de realizar las tareas programadas se evalúan para cada instante de tiempo en que exista una mantención requerida.

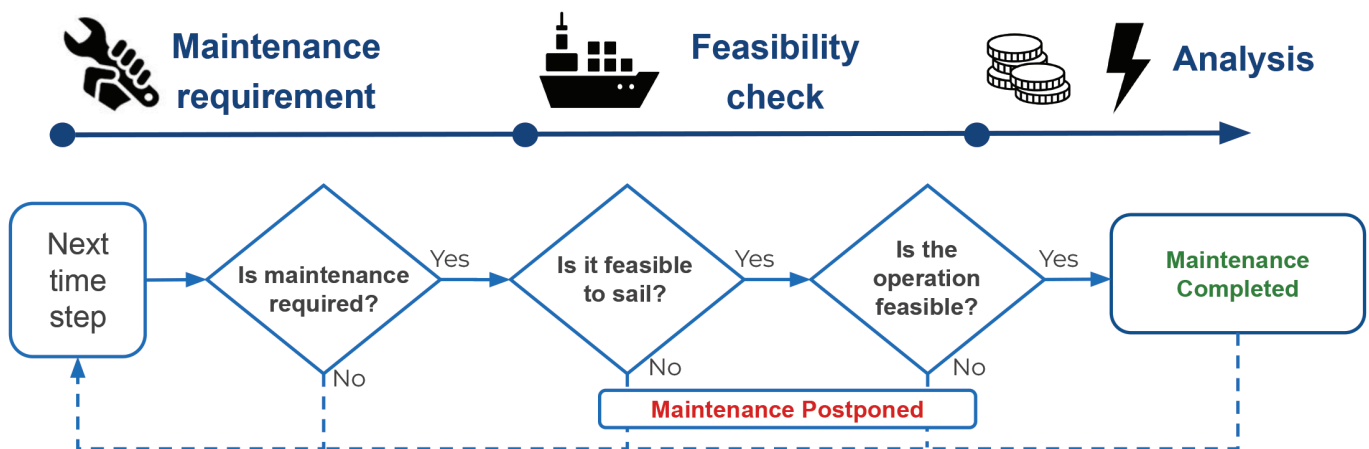


Fig. 8. Diagrama de flujo del modelo de eventos discretos de Adapt-ORE para evaluar la factibilidad de realizar una mantención. (Elaboración Propia)

Adapt-ORE entrega una serie de resultados de la evaluación del proyecto de energía marina, los que se despliegan en la interfaz como información sintetizada y gráficos (Fig. 9), o se guardan en archivos de salida. Entre estos resultados se encuentran: energía total generada a lo largo del proyecto, tiempos de espera totales en el puerto y en el sitio, energía perdida debido a las mantenciones, costos de mantención y ventanas de buen tiempo para el sitio.

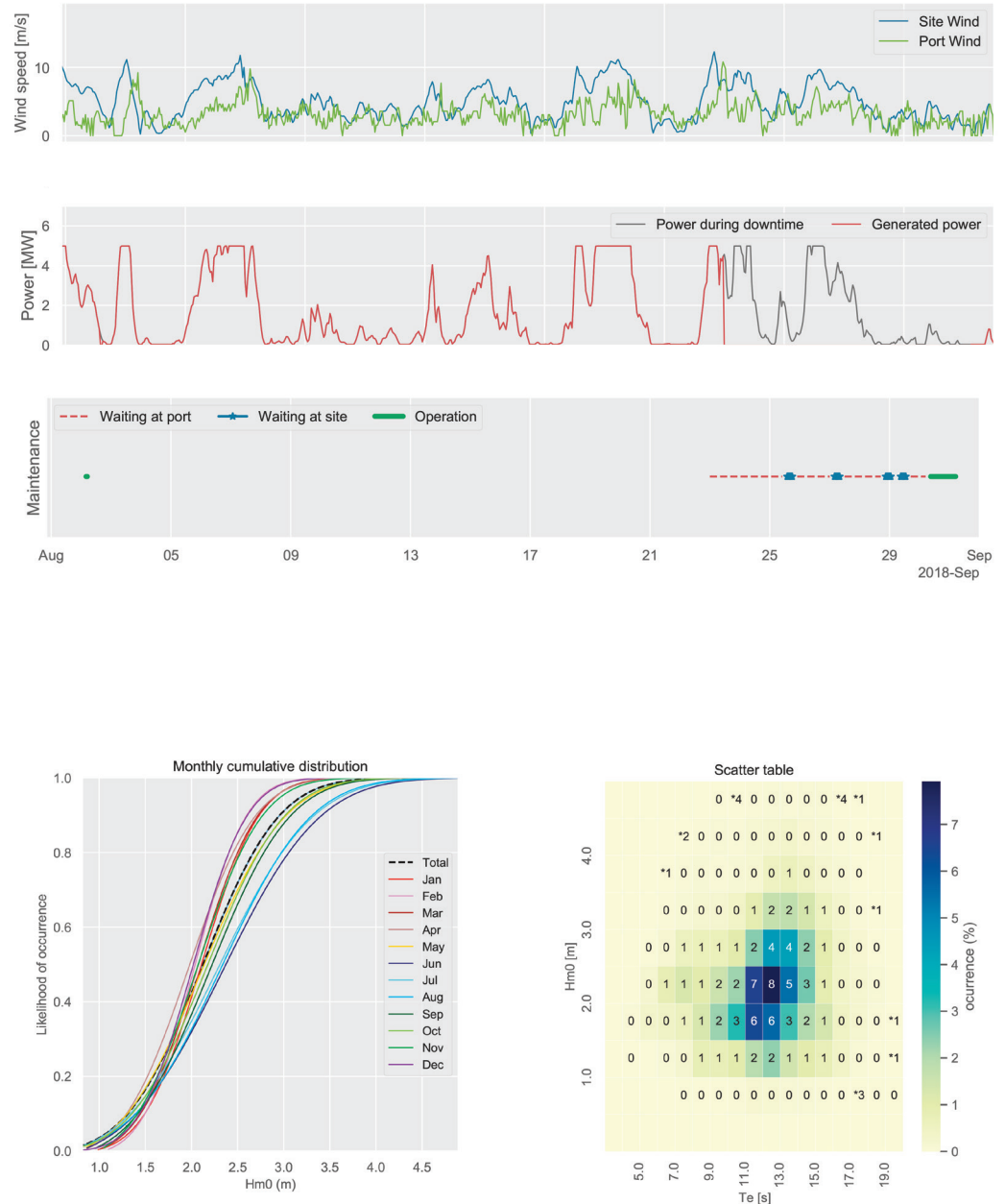


Fig. 9: Ejemplo de gráficos entregados por la herramienta Adapt-ORE para la evaluación de un proyecto de energía marina.



## 5.2 Ensayos de Canal

El Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Universidad Austral de Chile (CEH-UACH) es un laboratorio altamente especializado y único en Chile dedicado al desarrollo de investigación aplicada en hidrodinámica numérica y experimental con aplicación al diseño y optimización de formas de naves, análisis de respuesta en plataformas flotantes y estudio del comportamiento de flujo en sistemas sumergidos. El laboratorio lo compone un tanque de 45 m de longitud, 3 m de ancho y 2 m de profundidad, equipado con un generador de oleaje irregular unidireccional, cámaras para la captura de movimiento de objetos flotantes, diversos sensores de carga y altura de ola, además de un equipo para la visualización y análisis de características del flujo alrededor de objetos sumergidos sumado a un carro de arrastre que permite remolcar modelos a lo largo del tanque a velocidades de hasta 5 m/s, gracias a un servomotor de 5 kilowatts.

En el CEH-UACH se han realizado experimentos y análisis mediante herramientas numéricas para el desarrollo de capacidades de análisis de respuesta hidrodinámica de diversos tipos de sistemas para conversión de energía marina. Éstos se han centrado en la respuesta de estructuras flotantes frente a condiciones ambientales particulares de las costas nacionales, las cuales se caracterizan por oleajes de alta energía en condición de tormentas, y eventos puntuales, como lo son la ocurrencia cada día más común de marejadas, y eventuales tsunamis, a los cuales los sistemas de generación de energía marina deberán enfrentarse. Este tipo de cargas, marejadas y tsunamis, no han sido ampliamente analizadas a nivel global, ya que los actuales sitios de interés y desarrollo en Europa, Asia y Estados Unidos no se encuentran sometidos a tales eventos por lo que su estudio bajo condiciones locales presenta una oportunidad de investigación aplicada y una necesidad para los desarrolladores que busquen instalar sus tecnologías en el país.

Lo anterior ha implicado una modernización del instrumental del laboratorio y con ello, un énfasis en la formación de capital humano avanzado, tanto a nivel de pregrado como de postgrado, con competencias para abordar el quehacer del potencial desarrollo de tecnologías como la eólica flotante a nivel local y global. Para lo anterior, se han desarrollado modelos simples de sistemas de extracción de energía marina, destacando una plataforma flotante genérica que simula la estructura sobre la cual será instalado un aerogenerador (Fig. 10).

Esta experiencia ha implicado una acumulación de conocimiento desde la revisión a nivel global de tecnologías, el análisis de las capacidades instaladas en Chile para la construcción de los sistemas implicados en la plataforma, y las condiciones ambientales en las cuales deberá operar. Todo esto ha sido plasmado en una serie de trabajos de grado tanto en Chile como en Alemania [50, 51], presentaciones a nivel internacional [52] y publicaciones científicas [53], que sientan las bases para los proyectos actuales en desarrollo, entre los cuales destacan el análisis técnico y económico de diversas geometrías de plataformas para la instalación de generadores eólicos en canales del sur y, en base a los resultados obtenidos, el desarrollo de la ingeniería básica, de detalle y pronta construcción del primer piloto de plataforma eólica flotante chilena que considera su instalación en paralelo a un centro de cultivo de salmones en el mar interior frente a Chiloé. Esto se realiza tomando en consideración que uno de los mercados de interés a la hora de desarrollar este tipo de tecnologías en el país es la industria acuícola, debido a que se transforma en un usuario final de la energía generada, sin la necesidad del desarrollo de infraestructura de transmisión y conexión a la red de distribución central de energía del país.



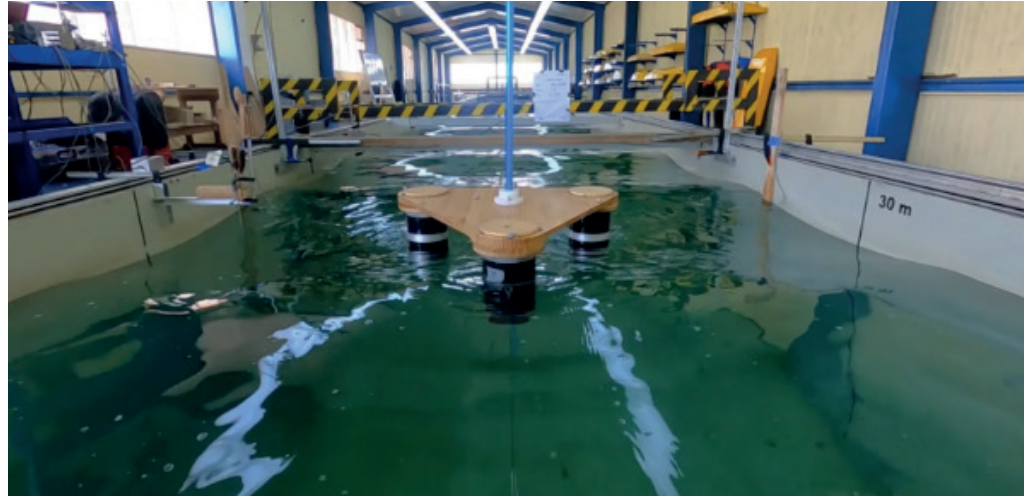


Fig. 10: Ensayos de plataforma eólica flotante en el CEH-UACH.

En el CEH-UACH se han realizado múltiples ensayos haciendo uso de la plataforma genérica desarrollada (Fig.10), bajo distintas condiciones de oleaje regular e irregular representativos de las condiciones locales de la zona sur del país. El propósito de estos ensayos es obtener un perfil del comportamiento hidrodinámico de la plataforma considerando sólo la masa del aerogenerador para centrar el análisis en la respuesta de la plataforma de soporte. El detalle de los resultados fueron publicados en el estudio Hertzsch, V. (2020) [50].

## 5.3 Simulaciones Numéricas

Usando los resultados experimentales y como una forma de extender el análisis a condiciones de carga complejas de ser representadas en el laboratorio, se han llevado a cabo una serie de simulaciones numéricas usando los métodos de la Dinámica de Fluidos Computacional, aplicando tanto en códigos potenciales para la determinación de respuesta en el dominio de la frecuencia, como viscosos para el estudio en el dominio del tiempo de efectos no lineales y de acoplamiento de cargas sobre los sistemas.

En el siguiente modelo (Fig.11) se muestra la geometría considerada en una de las simulaciones numéricas, la cual replica la configuración experimental vista anteriormente (Fig.10). Mientras de manera experimental en las instalaciones del CEH-UACH es sólo posible el análisis de un efecto a la vez, es decir olas o corrientes, en un tanque virtual es posible combinar los efectos de múltiples cargas ambientales entregando información vital a la hora del diseño de sistemas flotantes, particularmente bajo condiciones típicas de operación en Chile las cuales consideran gran energía de olas, vientos sostenidos y la eventual presencia de múltiples usuarios en las zonas de instalación. De igual manera, este tipo de herramientas permite simular la interacción entre cuerpos flotantes, lo que entrega información acerca de los límites en los cuales serían posible actividades de instalación, mantención y desmantelamiento de los sistemas al cerrar su ciclo de vida.

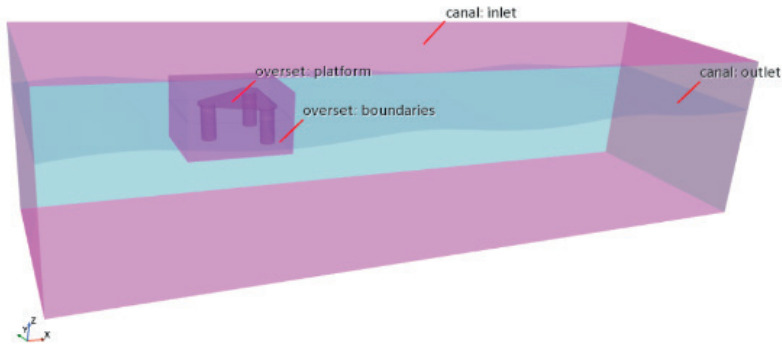


Fig. 11: Ejemplo de simulación numérica en plataforma eólica flotante.

Uno de los aspectos clave en el análisis de sistema flotantes, es su respuesta frente a eventos extremos, ya que en estas condiciones el sistema debe ser capaz de mantenerse a flote en su posición original, por lo que la predicción de sus movimientos y aceleraciones es un insumo de relevancia para el diseño estructural y en particular para su sistema de fondeo. Este tipo de condiciones pueden ser estimadas en el laboratorio, pero deben ser complementadas con simulaciones numéricas de mayor complejidad, las cuales son validadas mediante el uso de resultados experimentales. El estudio que se presenta en los gráficos (Fig.12) representa el comportamiento frente a una tormenta cuya probabilidad es de una en 100 años. Los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas muestran una correlación satisfactoria con los datos experimentales, permitiendo así la extensión de las capacidades de análisis de sistemas complejos frente a cargas, de interés para desarrolladores y operadores de tecnologías de generación de energía eólica en plataformas flotantes.

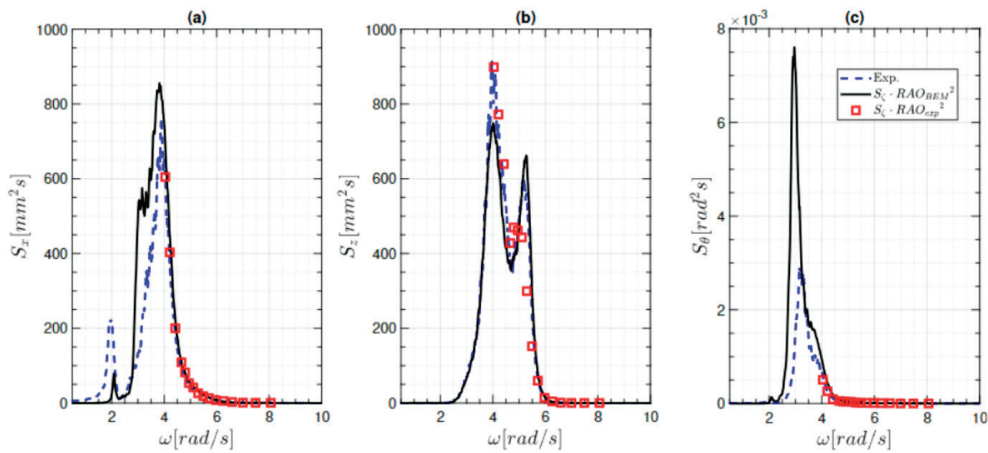


Fig. 12: Espectro de respuesta en condición de tormenta 100 años.

## 6. Conclusiones

---



El análisis presentado busca identificar una serie de aspectos clave que podrían jugar un rol preponderante a la hora de implementar proyectos de energía eólica offshore en Chile, considerando aspectos locales que pudieran ser críticos y que no necesariamente son evidentes a primera vista. Asimismo, se exponen algunas de las herramientas y capacidades desarrolladas por el Centro MERIC y la Universidad Austral de Chile para contribuir en distintas áreas, que han sido identificadas como relevantes. Considerando la importancia que tienen aspectos como el recurso, la batimetría, las condiciones de mar extremas y operacionales, el marco normativo y los requerimientos de equipamiento e infraestructura en Chile, se identificaron potenciales sitios y aplicaciones, y se establecieron recomendaciones para su desarrollo.

En particular, se pudo identificar que las regiones del Biobío y Los Ríos tienen el mayor potencial de desarrollo para la energía eólica offshore en el mediano y largo plazo, respectivamente. Si bien aún es necesario estudiar en mayor profundidad aspectos técnicos, ambientales y sociales, el desarrollo de una estrategia nacional que conlleve al desarrollo de un marco normativo de alto nivel técnico y de una planificación territorial que incluya a la Zona Económica Exclusiva son los aspectos más críticos para lograr el desarrollo de esta fuente de energía en Chile.

De igual manera, el uso de la energía eólica offshore en mercados nicho como la acuicultura y la desalación pueden permitir a corto plazo, experiencias tempranas con estas tecnologías en el país, a lo que se podría sumar un vasto potencial para la producción de hidrógeno verde en el largo plazo.

En su conjunto, 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 vasta Zona Económica Exclusiva.





# Bibliografía

1. World Bank. (2019). Going Global: Expanding Offshore Wind to Emerging Markets. Washington, D.C. : World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/716891572457609829/Going-Global-Expanding-Offshore-Wind-To-Emerging-Markets>
2. DNV. (2023). Floating Wind: Turning Ambition Into Action. <https://www.dnv.com/focus-areas/floating-offshore-wind/floating-wind-turning-ambition-into-action.html>
3. World Bank. (2020). Going Global : Expanding Offshore Wind to Emerging Markets (Vol. 33) : Technical Potential for Offshore Wind in Chile – Map (English). Washington, D.C. : World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/954421586853016235/Technical-Potential-for-Offshore-Wind-in-Chile-Map>
4. Global Wind Energy Council (2023). Global offshore wind report 2023. Brussels, Belgium. <https://gwec.net/gwecs-global-offshore-wind-report-2023/>
5. Westwood Global Energy Group (2023). Global Offshore Wind Report. <https://www.westwoodenergy.com/>
6. The Renewables Consulting Group (2022). Hoja de ruta para el despliegue de la energía eólica costa afuera en Colombia. <https://www.minenergia.gov.co/es/micrositios/energ%C3%ADa-e%C3%B3lica-costa-afuera/>
7. Tapia, P. (9 de junio de 2023). Energía eólica marina, ¿para cuándo en México?. Forbes. <https://www.forbes.com.mx/energia-eolica-marina-para-cuando-en-mexico/>
8. Norton Rose Fulbright. (31 de julio de 2023). Global offshore wind: Brazil. <https://www.nortonrosefulbright.com/en/knowledge/publications/cb3f61d6/global-offshore-wind-brazil>
9. World Bank. (2020). Offshore Wind Technical Potential - Analysis and Maps. [https://www.esmap.org/esmap\\_offshorewind\\_techpotential\\_analysis\\_maps](https://www.esmap.org/esmap_offshorewind_techpotential_analysis_maps)
10. ACERA. (s.f.). Centro de Información. Recuperado el 10 de noviembre de 2023 de <https://www.acera.cl/centro-de-informacion/>
11. Santana, C. (2014). Energías renovables en Chile: El potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé. <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/510>
12. Mattar, C., & Borvarán, D. (2016). Offshore wind power simulation by using WRF in the central coast of Chile. *Renewable energy*, 94, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.005>
13. Mattar, C., & Guzmán-Ibarra, M. C. (2017). A techno-economic assessment of offshore wind energy in Chile. *Energy*, 133, 191-205. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.099>
14. de Linaje, N. G. A., Mattar, C., & Borvarán, D. (2019). Quantifying the wind energy potential differences using different WRF initial conditions on Mediterranean coast of Chile. *Energy*, 188, 116027. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116027>
15. Mattar, C., Cabello-Español, F., & Alonso-de-Linaje, N. G. (2021). Towards a future scenario for offshore wind energy in Chile: breaking the paradigm. *Sustainability*, 13(13), 7013. <https://doi.org/10.3390/su13137013>
16. Neira, E., Fuentes, M., Salgado, F., & Jelves, L. (2021, December). Floating Offshore Wind Power: A Case Study for Concepción bay, Chile. In 2021 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON) (pp. 1-6). IEEE. [10.1109/CHILECON54041.2021.9702952](https://doi.org/10.1109/CHILECON54041.2021.9702952)
17. Crabtree C.J, Zappalá D, Hogg S.I. (2015). Wind energy: UK experiences and offshore operational challenges. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 229(7), 727-746. <https://doi.org/10.1177/0957650915597560>
18. Dighe, V. V., Pergod, L., y Yung, C. (2022). Offshore Wind Access Report 2022. Tech. Report, TNO. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:-2ba1f652-080b-4ba7-95e6-8081293c8ad2>
19. O'Connor, M., Lewis, T., & Dalton, G. (2013, June). Weather window analysis of Irish and Portuguese wave data with relevance to operations and maintenance of marine renewables. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 55423, p. V008T09A068). American Society of Mechanical Engineers. [10.1115/OMAE2013-11125](https://doi.org/10.1115/OMAE2013-11125)
20. Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E., & Agredano, R. (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard?. *Ocean & Coastal Management*, 156, 141-155. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.011>
21. Campos, R. (2016). Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile. [Tesis de pregrado, Universidad de Valparaíso]. Repositorio Atlas de Oleaje de Chile - Universidad de Valparaíso. <https://oleaje.uv.cl/descargas.html>
22. Ministerio del Medio Ambiente (2019). Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile (Resumen ejecutivo). Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D.; Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/2019-09-23-Informe-V00-CCCostas-Resumen-Ejecutivo-Rev1.pdf>
23. Winckler Grez, P., Aguirre, C., Farías, L. et al. (2020). Evidence of climate-driven changes on atmospheric, hydrological, and oceanographic variables along the Chilean coastal zone. *Climatic Change*, 163, 633-652. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02805-3>
24. Young, I. R. y Ribal, A. (2019). Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height. *Science*, 364,548-552. DOI: [10.1126/science.aav9527](https://doi.org/10.1126/science.aav9527)
25. Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beyá, J. F., & Molina, M. (2017). El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. *Latin american journal of aquatic research*, 45(4), 622-648. <http://dx.doi.org/10.3856/vol45-issue4-fulltext-1>
26. GEBCO Compilation Group (2023) GEBCO 2023 Grid (doi:10.5285/f98b053b-0cbc-6c23-e053-6c86abc0af7b)
27. Díaz-Naveas, J., & Frutos, J. (Eds.). (2010). Geología marina de Chile. Comité Oceanográfico Nacional de Chile. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. [http://www.cona.cl/pub/detalle\\_cientifica.php?pub=1](http://www.cona.cl/pub/detalle_cientifica.php?pub=1)
28. Völker, D., Geersen, J., Contreras-Reyes, E., Sellanes, J., Pantoja, S., Rabbel, W., ... & Weinrebe, W. R. (2014). Morphology and geology of the continental shelf and upper slope of southern Central Chile (33 S–43 S). *International Journal of Earth Sciences*, 103, 1765-1787. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00531-012-0795-y>
29. Galparsoro, I., Menchaca, I., Garmendia, J. M., Borja, Á., Maldonado, A. D., Iglesias, G., & Bald, J. (2022). Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms. *npj Ocean Sustainability*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.1038/s44183-022-00003-5>
30. Mishima, K., & Mishima, N. (2023). A Study on Visual Impacts of Wind Turbine Arrays in Offshore Wind Farms. In *Leveraging Transdisciplinary Engineering in a Changing and Connected World* (pp. 132-140). IOS Press. doi: 10.3233/ATDE230605
31. Sullivan, R. G., Kirchner, L. B., Cothren, J., & Winters, S. L. (2013). Offshore wind turbine visibility and visual impact threshold distances. *Environmental Practice*, 15(1), 33-49. <https://doi.org/10.1017/S1466046612000464>

32. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo (2014). Guía para la Aplicación de la Ley de Espacios Costeros Marinos para Pueblos Originarios. Santiago, Chile. [https://www.subpesca.cl/portal/616/articulos-82585\\_recurso\\_1.pdf](https://www.subpesca.cl/portal/616/articulos-82585_recurso_1.pdf)
33. Carrasco-Bahamonde, Daniel. (2022). Espacios Costeros Marinos de los Pueblos Originarios y salmonicultura en Chile. Dilemas en perspectiva histórica. *Revista de historia (Concepción)*, 29(1), 15-45. <https://dx.doi.org/10.29393/rh29-2ecdc10002>
34. Subpesca (s.f.). Espacios Costeros Marinos de los Pueblos Originarios. IDE Subpesca - Geoportal. Recuperado el 27 de noviembre de 2012 de <https://geoportal.subpesca.cl/portal/apps/sites/#/geoportal/pages/asuntos-indigenas>
35. Stelzenmüller, V., Gimpel, A., Letschert, J., Kraan, C., & Döring, R. (2020). RESEARCH FOR PECH COMMITTEE: Impact of the use of offshore wind and other marine renewables on European fisheries. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL\\_STU\(2020\)652212](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU(2020)652212)
36. McMorland, J., Collu, M., McMillan, D., & Carroll, J. (2022). Operation and maintenance for floating wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163, 112499. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112499>
37. Det Norske Veritas, "Offshore Standard DNVGL-OS-E301 Position mooring," DNV-GL, 2015. <https://doi.org/10.1590/1679-78255692>
38. NORSOK. (1997). NORSOK Standard: Marine Operations, Norwegian Standard.
39. DNV. (2018). DNVGL-ST-N001 Marine operations and marine warranty. <https://www.dnv.com/oilgas/download/dnv-st-n001-marine-operations-and-marine-warranty.html>
40. International Organization for Standardization. (2019). ISO 19901-6:2009, Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures - Part 6: Marine operations. <https://www.iso.org/standard/34591.html>
41. Demy, C. (27 de junio de 2023). Exclusive: Brazil aims to pass offshore wind, green hydrogen laws by year-end, energy minister says. REUTERS. <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/brazil-aims-pass-offshore-wind-green-hydrogen-laws-by-year-end-energy-minister-2023-06-27/>
42. Naciones Unidas (1987). CONVENCIÓN. DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL DERECHO DEL MAR. [https://www.un.org/Depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/convemar\\_es.pdf](https://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/convemar_es.pdf)
43. Ministerio de Relaciones Exteriores. (2023). PROGRAMA OCEÁNICO NACIONAL "Plan Oceánico Sostenible Chile 2023". Santiago, Chile. [https://www.minrel.gob.cl/minrel/site/docs/20230523/20230523111434/programa\\_oceanico\\_2023.pdf](https://www.minrel.gob.cl/minrel/site/docs/20230523/20230523111434/programa_oceanico_2023.pdf)
44. Neil N. Davis, Jake Badger, Andrea N. Hahmann, Brian O. Hansen, Niels G. Mortensen, Mark Kelly, Xiaoli G. Larsén, Bjarke T. Olsen, Rogier Floors, Gil Lizcano, Pau Casso, Oriol Lacave, Albert Bosch, Ides Bauwens, Oliver James Knight, Albertine Potter van Loon, Rachel Fox, Tigran Parvanyan, Søren Bo Krohn Hansen, Duncan Heathfield, Marko Onninen, Ray Drummond. (2023). The Global Wind Atlas: A high-resolution dataset of climatologies and associated web-based application; *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 104: Issue 8, Pages E1507-E1525. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0075.1>
45. SPLogistics. (12 de julio de 2022). Los 7 principales puertos marítimos de Chile. <https://web.splogistics.com/blog/post/551/los-7-principales-puertos-maritimos-de-chile>
46. Coordinador Eléctrico Nacional. (28 de noviembre de 2023). Planificación y Desarrollo. <https://www.coordinador.cl/desarrollo/graficos/planificacion-de-la-transmision/demanda-proyectada/>
47. Freeman, M. C., Garavelli, L., Wilson, E., Hemer, M., Abundo, M. L., & Travis, L. E. (2022). Offshore aquaculture: a market for ocean renewable energy. Report for Ocean Energy Systems (OES): Lisbon, Portugal. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-documents/market-policy-/document/offshore-aquaculture-a-market-for-ocean-renewable-energy/>
48. Ibrahim, O. S., Singlitico, A., Proskovics, R., McDonagh, S., Desmond, C., & Murphy, J. D. (2022). Dedicated large-scale floating offshore wind to hydrogen: Assessing design variables in proposed typologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112310. [10.1016/j.rser.2022.112310](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112310)
49. Jara, N. (2023). Obtención numérica de límites operacionales mediante uso del open source BEM-solver NEMOH. [Tesis Ingeniería Naval, Universidad Austral de Chile] Repositorio Institucional – Universidad Austral de Chile.
50. Hertzsch, V. (2020). Experimental Analysis of Motions and Loads for a Floating Offshore Wind Platform in Waves [Master of Science, Technische Universität Berlin]. Repositorio Institucional - Technische Universität Berlin.
51. Álvarez, K. Ahumada, J., Cifuentes, C., & Tampier, G. (2023). Análisis numérico de la respuesta hidrodinámica de una plataforma eólica flotante en olas regulares. [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile]. Repositorio Institucional - Universidad Austral de Chile.
52. Tampier, G. (8-10 de marzo de 2023). Installation and Maintenance of Offshore Renewable Energy Technologies. VIII Congreso Internacional de Diseño e Ingeniería Naval - Colombiamar. Cartagena de Indias, Colombia.
53. Álvarez-Castillo, K., Ahumada, J. M., Cifuentes, C., Tampier, G., & Gallardo, Á. (2023). Numerical analysis of the dynamic behavior of a Floating Wind Platform in regular waves. *Ship Science and Technology*, 16(32), 43-54. <https://doi.org/10.25043/19098642.135>



