

Identificación de los posibles Impactos Ambientales de la producción de hidrógeno verde a partir de proyectos eólicos offshore. Caso de Estudio: Zona Económica Exclusiva de Uruguay

Identification of Potential Environmental Impacts from
Green Hydrogen
Production through Offshore Wind Projects:
A Case Study in Uruguay's
Exclusive Economic Zone

25

Luisa Rivas¹, Alice Elizabeth González², Alejandro Gutierrez³
Recibido: 02/10/2024 y Aceptado: 03/12/2024



1.- Universidad de la Republica del Uruguay
2.- Universidad de la Republica del Uruguay
3.- Universidad de la Republica del Uruguay

luisarivas10@gmail.com
elizabeth@fing.edu.uy
aguti@fing.edu.uy

ORCID: 0009-0002-5662-2573
ORCID: 0000-0002-2827-5052
ORCID: 0000-0002-0769-3861



Resumen

El presente trabajo identifica los potenciales impactos ambientales de la producción de hidrógeno verde en proyectos eólicos offshore en la Zona Económica Exclusiva de Uruguay. El Hidrógeno verde es una alternativa para descarbonizar el sector energético. La eólica offshore, dado la potencia nominal de los aerogeneradores, ofrece mayor potencial de generación eléctrica, pero conlleva mayores costos y complejidades técnicas. Se examinan las actividades durante las etapas de desarrollo, construcción y operación. A partir de la revisión de investigaciones ambientales sobre proyectos similares, se identifican los impactos ambientales principales en cada fase. Durante el desarrollo, se observan impactos como aumento de ruido, vibraciones y alteraciones en el lecho marino debido a estudios geofísicos y geotécnicos. En construcción, el dragado y la instalación de fundaciones y cables pueden suspender sedimentos, afectar la calidad del agua y aumentar el ruido afectando la fauna marina. En operación, los impactos incluyen colisiones de aves y aumento del ruido submarino. La desalinización del agua puede alterar la calidad del agua, pero conserva los recursos hídricos terrestres.

Esta investigación busca ofrecer una visión integral que sirva de base para la toma de decisiones de los responsables de políticas, los desarrolladores de proyectos y actores clave.

PALABRAS CLAVE: Hidrógeno Verde, Impacto Ambiental, Energía Eólica Offshore, Electrólisis, desalinización, Uruguay.

27

Abstract

This paper analyzes the potential environmental impacts of green hydrogen production in offshore wind projects in Uruguay's Exclusive Economic Zone. Green hydrogen is an alternative for decarbonizing the energy sector, although its production requires significant resources. Offshore wind, given the nominal power of the turbines, offers greater electricity generation potential but involves higher costs and technical complexities. The activities during the development, construction, and operation phases are identified. Based on a review of environmental research on offshore wind projects and green hydrogen production, the main environmental impacts in each phase are identified. During development, impacts such as increased noise, vibrations, and alterations to the seabed due to geophysical and geotechnical studies are observed. In construction, dredging and the installation of foundations and cables can resuspend sediments, affect water quality, and increase noise, impacting marine fauna. During operation, impacts include bird collisions and increased underwater noise. Desalination of water may alter the salinity and oxygenation of the water but preserves terrestrial water resources. Other impacts include noise and the risk of gas leaks. This research aims to provide a comprehensive perspective that can serve as a basis for decision-making by policymakers, project developers, and other key stakeholders.

KEYWORDS: Green Hydrogen, Environmental Impact, Offshore Wind Energy, Electrolysis, Desalination, Uruguay.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el cambio climático y la demanda de fuentes de energía sostenibles han incrementado el interés en tecnologías renovables y bajas en emisiones de gases de efecto invernadero como la energía eólica offshore y la producción de Hidrógeno (H₂) verde. Esta investigación explora dichas tecnologías, específicamente en la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Uruguay para identificar sus posibles impactos ambientales. El H₂ verde, producido mediante la electrólisis del agua con electricidad de fuentes renovables, es un vector energético con bajas emisiones y potencial para aplicaciones industriales, de transporte y almacenamiento de energía. Ofrece una forma eficiente de almacenar energía e integrarse en infraestructuras energéticas existentes. Por otro lado, la energía eólica offshore, que aprovecha los vientos marinos, es una alternativa con bajas emisiones y ha avanzado con mejoras en la eficiencia de aerogeneradores y técnicas de construcción y mantenimiento. Uruguay, con su amplia costa, buenos recursos naturales y experiencia en energías renovables, es

un candidato ideal para implementar proyectos de H₂ verde y energía eólica offshore. La investigación tiene como objetivo principal identificar los impactos ambientales de este tipo de proyectos offshore dentro de la ZEE de Uruguay. Se llevará a cabo una revisión bibliográfica detallada sobre los conceptos de generación eólica y producción de H₂ verde, tecnologías específicas, procedimientos de operación y mantenimiento, como también estudios de caracterización ambiental de la ZEE, para posteriormente realizar el análisis e identificación de los impactos potenciales en el medio físico, biótico y antrópico que pueden ocurrir en cada fase de un proyecto e identificar cuáles son los factores ambientales que pueden verse más afectados. Estos resultados podrían proporcionar una visión integral para ser usados como base de partida en análisis específicos e informar a responsables de políticas y desarrolladores de proyectos.

2. METODOLOGÍA APLICADA

Este estudio busca identificar los impactos ambientales de proyectos de hidrógeno verde y energía eólica offshore mediante una revisión bibliográfica que integra aspectos técnicos, ambientales y normativos. La metodología se

estructuró en cuatro fases principales: revisión de conceptos básicos, revisión de tecnologías, evaluación de estudios ambientales previos e identificación de impactos clave.

2.1. Conceptos básicos del Hidrógeno Verde y la Energía Eólica offshore

El hidrógeno verde se produce mediante electrólisis, un proceso que separa el agua en hidrógeno y oxígeno utilizando un electrolizador. Para garantizar bajas emisiones de CO₂, y ser catalogado como “verde” este proceso requiere energía eléctrica proveniente de fuentes renovables. (Goldman Sachs International, 2022).

instalados en masas de agua, normalmente en océanos o grandes lagos. A diferencia de la energía eólica terrestre, los parques eólicos offshore se construyen en áreas costeras o en alta mar, es en general una ventaja que la potencia nominal de los aerogeneradores offshore es superior a la onshore. (Letcher, 2017).

La energía eólica offshore se refiere a la generación de electricidad a partir de aerogeneradores

2.2. Análisis de Tecnologías Asociadas

Se realizó una revisión detallada de las tecnologías utilizadas en proyectos eólicos offshore y de H2 verde, evaluando sus actividades durante las fases de desarrollo, construcción y operación de los proyectos, considerando las siguientes áreas clave:

2.2.1 Etapa de Desarrollo

La etapa de desarrollo de un proyecto eólico offshore incluye todas las actividades previas al cierre financiero, lo que puede llevar hasta tres años (BVG Associates, 2019). Un componente crítico es el Estudio de Impacto Ambiental, que implica levantamiento de líneas base y estudios específicos sobre clima, ruido, fauna marina, avifauna, hábitats, navegación, pesca, y aspectos socioeconómicos.

Los estudios del recurso eólico y datos meteoceánicos evalúan la velocidad del viento a alturas aproximadas de 150-250 metros sobre el nivel del mar mediante torres meteorológicas, anemómetros y sistemas remotos como lidars

y boyas metoceanográficas. Estos datos son esenciales para determinar la viabilidad técnica del proyecto. Los estudios geofísicos, geotécnicos e hidrológicos emplean técnicas no invasivas como sondeos sísmicos y batimetría para mapear el lecho marino. También se realizan perforaciones y pruebas de penetración para caracterizar el suelo y planificar las rutas de cableado submarino, asegurando la estabilidad y viabilidad de las instalaciones (BVG Associates, 2019).

29

2.2.2. Análisis de Tecnologías

a) Aerogeneradores Offshore: Los aerogeneradores offshore son más grandes y potentes que los terrestres, alcanzando capacidades de hasta 16 MW, como el modelo Goldwind GWH252-16 MW con rotores de 250 metros de diámetro (TGS New Energy, 2024). Su diseño maximiza la generación eléctrica en áreas reducidas, aprovechando vientos constantes en alta mar. No obstante, el transporte e instalación de componentes voluminosos y pesados plantean desafíos logísticos, que además enfrentan condiciones extremas del entorno marino, como la corrosión, las fuertes corrientes y el oleaje.

b) Fundaciones: Las fundaciones proporcionan estabilidad estructural y se clasifican en fijas y flotantes. Las fijas, como los monopilotes y estructuras tipo jackets, son adecuadas para aguas poco profundas (0-80 m). Las flotantes,

ancladas mediante cables o tensores, permiten proyectos en aguas más profundas, expandiendo la viabilidad de parques eólicos en diversas regiones (Fan et al., 2022).

c) Cableado Submarino y Subestaciones: El cableado de media y alta tensión conecta los aerogeneradores a subestaciones offshore y a tierra firme. Estas subestaciones transforman la electricidad de media a alta tensión, mejorando la eficiencia del transporte energético. Su diseño robusto debe resistir la exposición a corrientes marinas y condiciones adversas (Rodríguez, 2020).

d) Electrólisis y Almacenamiento: La electrólisis es un proceso químico que utiliza energía eléctrica para descomponer agua en sus componentes básicos, hidrógeno y oxígeno. La tecnología PEM

destaca en la producción de H2 verde, siendo viable para fuentes renovables intermitentes gracias a su flexibilidad y alta pureza del H2. Sin embargo, los costos elevados y los desafíos de almacenamiento, como la fragilización de materiales y el manejo de residuos químicos, requieren soluciones integradas para garantizar sostenibilidad y seguridad operativa (Calado & Castro, 2023).

e) Operación y mantenimiento: La fase de operación y mantenimiento (O&M) de parques eólicos offshore es esencial para garantizar su eficiencia y longevidad. Este proceso incluye mantenimiento planificado y no planificado. El primero se realiza periódicamente, siguiendo un calendario de

inspecciones visuales, revisiones mecánicas y reemplazo de componentes desgastados para prevenir fallos. El segundo abarca reparaciones emergentes derivadas de daños por tormentas, fallos electrónicos o mecánicos inesperados, que requieren una rápida movilización de equipos especializados (Thomsen, 2012).

En proyectos de hidrógeno verde, el O&M incluye la desalinización de agua para electrólisis, compresión y almacenamiento del hidrógeno, así como la eliminación segura de residuos líquidos y sólidos generados durante las operaciones, asegurando la sostenibilidad del sistema (Calado & Castro, 2023).

2.3. Revisión de literatura científica y resultados de otros proyectos similares

La revisión de publicaciones científicas identificó los principales impactos ambientales asociados a proyectos eólicos offshore y de hidrógeno verde:

- Aves y Mamíferos Marinos: Desplazamiento, colisiones y alteración de hábitats debido a la construcción y operación, con impactos acumulativos entre proyectos cercanos.
- Peces y Comunidades Bentónicas: Modificación de comunidades por sustratos duros y arrecifes artificiales, con beneficios locales, pero riesgos de perturbaciones.
- Impactos de la producción de Hidrógeno Verde: Impactos por demanda de agua, descargas de salmuera y uso de metales

raros, junto con riesgos de contaminación por fugas químicas.

- Comunidades Locales: Afectación de la pesca artesanal, conflictos por el espacio marítimo y presión sobre servicios por trabajadores externos.

Estos hallazgos establecen un marco para abordar impactos clave en futuros proyectos en la ZEE de Uruguay.

2.4. Identificación de Impactos Ambientales

Para avanzar con la identificación de los impactos ambientales se evaluaron y listaron las actividades en cada etapa del proyecto (desarrollo, construcción y operación) determinando los medios y factores ambientales asociados a cada actividad. De acuerdo con Zaror (2000), los factores ambientales son diversos componentes del ambiente susceptibles de ser modificados por la acción humana.

Los factores ambientales que se evaluarán dentro de cada Medio son los siguientes:

- Factores evaluados dentro del Medio Físico: Lecho Marino / Suelo, niveles sonoros ambientales, calidad del agua superficial, calidad del aire, temperatura del agua superficial e hidroquímica, presiones sobre los recursos naturales.

- Factores evaluados dentro del Medio Biótico: Fauna: Plancton, Bentos, Necton, Peces, Aves, Reptiles, Mamíferos Marinos, Cefalópodos; y flora acuática y flora superficial.
- Factores evaluados dentro del Medio Antrópico: Paisaje, Pesca, navegación y tráfico marítimo y terrestre.

ejemplo de una sección de las tablas utilizadas para la identificación de impactos durante cada fase del proyecto.

A continuación, se identificó la relación de cada actividad del proyecto con los efectos potenciales en el Medio, así como los impactos ambientales en sus diferentes etapas. La Figura 1. muestra un

Figura 1. Sección de la tabla “Actividades que pueden ocurrir en la fase de desarrollo del proyecto, con sus posibles impactos y factores ambientales relevantes”.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor ambiental	Vinculación
Estudios geotécnicos y geofísicos	Alteración de Fauna marina	Biótico	Fauna marina	Los estudios geotécnicos y geofísicos pueden ocasionar alteración de fauna marina por perturbaciones durante los momentos de muestreo.
	Alteración del lecho marino	Biótico	Fauna y flora marinas	Durante la elaboración de los estudios geotécnicos puede ocurrir posible remoción del lecho marino en diferentes áreas de estudio (Subsea Working Group, 2000)
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	Los estudios geológicos y geofísicos pueden utilizar ondas sonoras que se reflejan en las estructuras del lecho marino para recopilar datos sobre las condiciones en y debajo del lecho marino. El ruido generado por estos estudios puede causar lesiones, pérdida de audición o cambios de comportamiento, entre otros impactos, en ciertas especies marinas (Congressional Research Service, 2024)

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, con los resultados de las tablas obtenidas, se analizaron los impactos ambientales en función de su grado de incidencia, determinando cuáles son los que aparecen con mayor frecuencia pudiendo ocasionar mayor afectación en cada fase del proyecto y así determinar cuáles son los medios y factores ambientales más afectados.

diseño de medidas de mitigación adaptadas a las condiciones locales, apoyando la sostenibilidad de proyectos en Uruguay y en contextos similares.

La estrategia de evaluación utilizada integra aspectos técnicos y ambientales, identificando las actividades e impactos ambientales más relevantes en cada fase del proyecto. Este enfoque no solo facilita la identificación de impactos clave en una fase temprana, sino que también ofrece una base inicial para la toma de decisiones en el

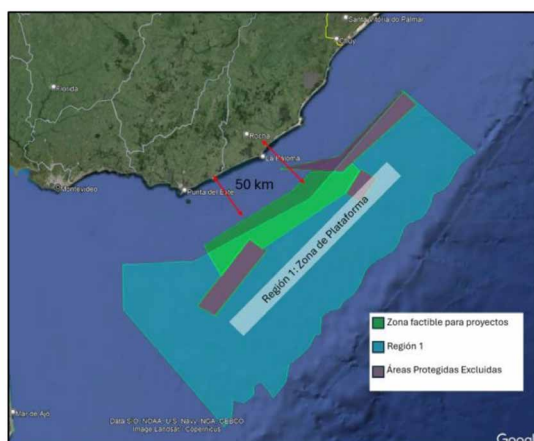
3. RESULTADOS OBTENIDOS:

3.1. Identificación de los impactos ambientales en un proyecto ubicado en la Zona Económica Exclusiva del Uruguay

Con base en la información de la caracterización ambiental de la ZEE, se establecieron criterios para delimitar áreas factibles para proyectos y sugerir un área viable. Debido a limitaciones tecnológicas de las fundaciones fijas, se seleccionaron áreas hasta profundidades máximas de 100 m, también se excluyeron áreas protegidas a nivel nacional, rutas de buques mercantes y zonas pesqueras.

La Figura 2 ilustra esta delimitación. Un mayor detalle en la delimitación necesitará de un análisis exhaustivo de la información tomando en cuenta muchos más elementos del entorno marino.

Figura 2. Delimitación de la Zona factible para proyectos eólicos offshore dentro de la ZEE.



Fuente: elaboración propia.

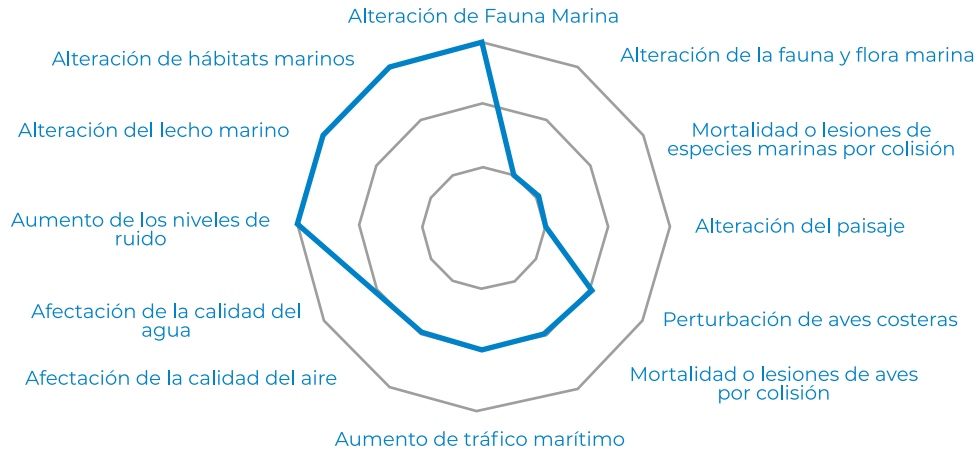
A continuación, se presentarán los principales impactos ambientales identificados que pueden afectar la ZEE de Uruguay, para cada fase del proyecto.

3.2. Fase de desarrollo

La fase de desarrollo involucra una serie de actividades que incluyen estudios oceanográficos, sísmicos, geofísicos, geotécnicos y la instalación de infraestructuras como torres de medición de viento y boyas (BVG Associates, 2019). A continuación,

en la Figura 3 se muestran los resultados de los principales impactos ambientales asociados con estas actividades.

Figura 3. Principales impactos ambientales identificados en la Fase de Desarrollo.



Fuente: elaboración propia.

Los impactos ambientales más relevantes están relacionados con el medio biótico, siendo la fauna marina la más afectada. Los niveles de ruido generados por estudios geofísicos y geotécnicos son una preocupación principal, ya que estos pueden alterar comportamientos, causar daños físicos y afectar la reproducción y comunicación de diversas especies. Estudios como los sísmicos de aire comprimido y los de alta resolución (HRG) generan pulsos sonoros que penetran el subsuelo, lo que puede impactar de forma significativa a peces, mamíferos marinos, tortugas y cefalópodos (BOEM, 2018) que pueden estar presentes en la ZEE de Uruguay.

El aumento del tráfico marítimo asociado a las actividades de exploración también incrementa el riesgo de colisiones con fauna marina, particularmente mamíferos y aves, y contribuye al ruido submarino, afectando patrones migratorios y de comportamiento de las especies (Congressional Research Service, 2024).

Adicionalmente, las actividades de instalación, como la colocación de bases para torres de medición de vientos, pueden generar remoción de sedimentos, perturbando los hábitats del fondo marino y afectando comunidades de plancton y bentos, lo que puede alterar la red trófica.

Especies como cefalópodos pueden experimentar daños en sus estatocistos, esenciales para su equilibrio, cuando se exponen a sonidos de baja frecuencia (50-400 Hz) y niveles de presión sonora de hasta 175 dB pico (Oisín, Rogério & Coca, 2023).

Otros impactos identificados incluyen la afectación de la calidad del agua debido a derrames accidentales de embarcaciones o al movimiento de sedimentos, y la alteración de la calidad del aire por emisiones de los equipos y transporte marítimo. Estas alteraciones pueden dañar ecosistemas y disminuir la biodiversidad del área de estudio (Zhou, 2019). Finalmente, aunque de menor frecuencia, la alteración del paisaje marino, influenciada por el tráfico marítimo y la presencia de estructuras temporales, puede afectar la calidad del paisaje, como también la interacción de aves y mamíferos marinos con sus hábitats. Es esencial considerar estos impactos acumulativos y sus efectos sinérgicos durante esta etapa para garantizar una planificación sostenible, en especial si se pretenden desarrollar distintos proyectos al mismo tiempo en la ZEE.

3.2.1. Medidas de Mitigación

Las medidas de mitigación propuestas se centran en minimizar los impactos en el medio biótico y físico durante la etapa de desarrollo. Para proteger el medio biótico, se sugiere implementar monitoreo visual de mamíferos marinos y monitoreo acústico pasivo mediante hidrófonos para detectar fauna cercana. Se recomienda establecer zonas de exclusión acústica alrededor de las embarcaciones y utilizar inicios suaves (soft starts) para aumentar gradualmente la potencia de las fuentes acústicas, permitiendo que los animales marinos se alejen del área antes de alcanzar niveles de ruido altos (BOEM, 2018). Además, se deben realizar pruebas preliminares de calibración de equipos para minimizar el uso innecesario de potencia y ruido.

implementar cierres temporales y espaciales en hábitats críticos y rutas migratorias, especialmente para ballenas y tortugas. Es fundamental realizar estudios de línea de base con campañas de muestreo estacionales para establecer referencias detalladas del entorno marino.

Para el medio físico, las medidas incluyen la contención y prevención de derrames mediante barreras físicas, planes de respuesta rápida y equipos especializados. Se recomienda reducir las emisiones atmosféricas de las embarcaciones mediante tecnologías como filtros de partículas y catalizadores, además de optimizar rutas y operaciones para disminuir el tiempo de funcionamiento de motores y maquinaria.

La planificación temporal y espacial es clave, evitando actividades durante las temporadas de desove y cría, así como minimizando la superposición de estudios en áreas cercanas para permitir la recuperación de las poblaciones marinas. También se sugiere

En cuanto al medio antrópico, se enfatiza la planificación de tráfico marítimo mediante la definición de rutas seguras y velocidades máximas para reducir el riesgo de colisiones con fauna marina y minimizar el ruido submarino.

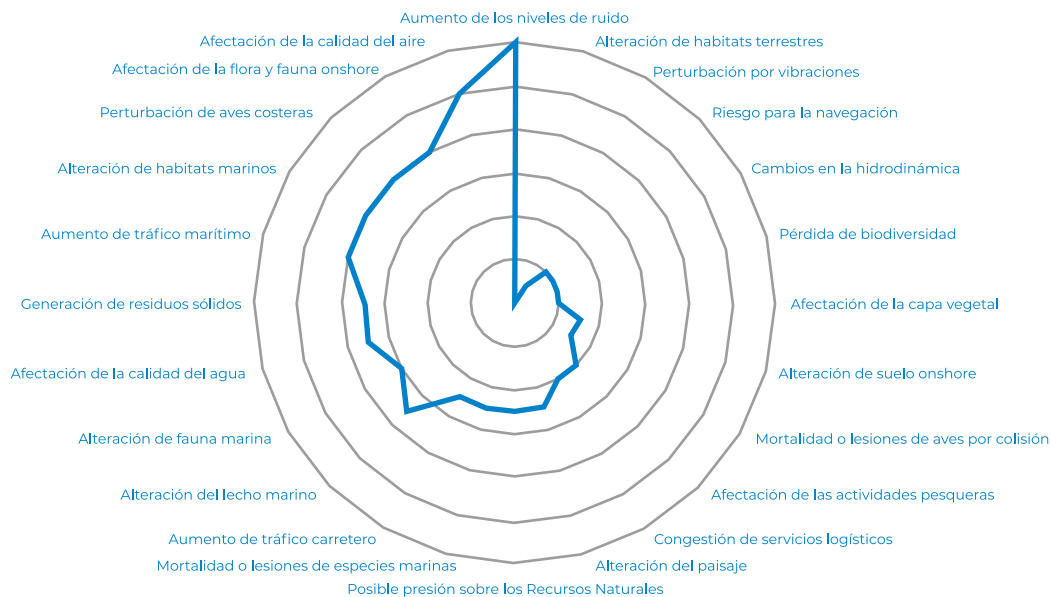
34

3.2.2. Fase de construcción

Durante la fase de construcción los impactos ambientales más relevantes están asociados con alteraciones significativas en los ecosistemas

marinos. A continuación, en la Figura 4 se muestran los resultados de los principales impactos identificados durante esta fase.

Figura 4. Principales impactos ambientales identificados en la Fase de Construcción.



Fuente: elaboración propia.

Entre los impactos más destacados se encuentra el aumento del ruido submarino, generado principalmente durante la instalación de fundaciones mediante martillos hidráulicos o percutores vibratorios. Este ruido puede inducir comportamientos de evitación en mamíferos marinos como delfines, ballenas y lobos marinos, además de causar daños físicos en tejidos auditivos y otros órganos de peces y cefalópodos, todas estas especies presentes en la ZEE. La sensibilidad de estas especies al sonido, esencial para su navegación, búsqueda de alimento y comunicación, hace que estos impactos sean especialmente críticos (T. Aran Mooney, 2020). Las actividades relacionadas con el pilotaje también modifican el comportamiento de especies marinas a grandes distancias y pueden alterar patrones migratorios clave.

La instalación de cables y estructuras submarinas afecta considerablemente a los hábitats bentónicos, desplazando sedimentos, aumentando la turbidez del agua y modificando la biodiversidad local. Estas alteraciones pueden perjudicar a organismos como poliquetos, crustáceos y equinodermos, esenciales para las dinámicas ecológicas del fondo marino. Además, la turbidez incrementada afecta la penetración de luz, reduciendo la fotosíntesis del fitoplancton y alterando las cadenas tróficas marinas (Van Hoey, 2018). Según Köller (2006), los impactos en fondos arenosos pueden favorecer especies de fondos duros, pero eliminan hábitats blandos y afectan la biodiversidad asociada.

La calidad del agua enfrenta riesgos significativos debido a derrames operativos o accidentales de combustibles, liberación de sedimentos y posibles contaminantes provenientes de las actividades de construcción. Estas alteraciones hidroquímicas y físicas pueden dañar directamente a las especies acuáticas y generar impactos a largo plazo en los ecosistemas marinos. Paralelamente, las emisiones atmosféricas generadas por maquinaria pesada, buques y equipos de soldadura contribuyen a la contaminación del aire, afectando tanto a las comunidades locales como a la biodiversidad costera (Thomsen, 2012).

El incremento del tráfico marítimo y terrestre durante la construcción añade complejidad a los impactos. El transporte continuo de materiales y equipos aumenta el riesgo de colisiones entre embarcaciones y especies marinas como tortugas, aves y mamíferos marinos. Estas colisiones pueden causar lesiones graves o mortales, y el ruido generado por el tráfico marítimo afecta aún más a la fauna marina, especialmente a especies dependientes del sonido (Byrnes & Dunn, 2020). Las restricciones de navegación impuestas para garantizar la seguridad durante la construcción también pueden interferir con actividades económicas como la pesca, afectando directamente los medios de vida de las comunidades locales (Van Hoey, 2018).

Otro impacto relevante es la presión sobre los recursos naturales debido al consumo intensivo de materiales como acero, concreto, cobre y otros metales esenciales para las estructuras y membranas de los electrolizadores. Este consumo genera una huella significativa de gases de efecto invernadero durante la producción de estos materiales, incrementando los impactos ambientales del proyecto (Condon, 2023). Además, la generación de residuos, incluyendo materiales de construcción y aceites usados, plantea desafíos en su gestión, destacando la necesidad de sistemas adecuados para su recolección, reciclaje y eliminación segura (Thomsen, 2012).

Finalmente, la congestión de servicios logísticos, como los puertos, representa un desafío tanto técnico como ambiental. La selección inadecuada de puertos puede generar demoras significativas en las operaciones logísticas y conflictos con las comunidades costeras debido a impactos visuales y restricciones en el acceso a áreas públicas (Thomsen, 2012). A pesar de estos desafíos, la fase de construcción también ofrece oportunidades de generación de empleo y desarrollo económico local, creando empleos directos e indirectos en sectores como la logística, los servicios y la construcción, lo que puede contribuir positivamente al bienestar de las comunidades cercanas.

3.2.3. Medidas de Mitigación

La mitigación de los impactos ambientales durante la fase de construcción incluye un conjunto integral de medidas. Para reducir el impacto del ruido submarino, se propone el uso de pingers, dispositivos acústicos que emiten señales fuertes para alejar a los mamíferos marinos de las áreas de construcción, evitando daños en su sistema auditivo y posibles lesiones permanentes. Además, las cortinas de burbujas ofrecen una barrera acústica al generar burbujas con aire presurizado, disminuyendo la transmisión de ruido bajo el agua, aunque su eficacia depende de las condiciones del entorno marino (Thomsen, 2012, pág. 288). Asimismo, los sistemas de propulsión a chorro son recomendados para embarcaciones, ya que reducen el riesgo de lesiones en tortugas marinas y otras especies debido a la ausencia de hélices (Byrnes & Dunn, 2020).

36 Se deben implementar planes de contingencia que gestionen posibles derrames de aceites y sustancias contaminantes, y se debe minimizar el uso de generadores eléctricos temporales que utilicen combustibles fósiles (Thomsen, 2012). También es recomendable utilizar materiales no contaminantes, como cables libres de hidrocarburos, para evitar la liberación de sustancias tóxicas al entorno marino, protegiendo la fauna y flora local (Bastien et al., 2018). La planificación estratégica de actividades puede prevenir impactos acumulativos al coordinar varias obras simultáneas en una misma región (Thomsen, 2012).

En relación con el lecho marino, se recomienda planificar cuidadosamente las rutas de los cables submarinos para evitar áreas ecológicamente sensibles, así como enterrar los cables a profundidades que minimicen la exposición de las especies marinas a campos electromagnéticos y calor. Esto protege organismos como tiburones, rayas y peces diádromos presentes en la ZEE, además de reducir el riesgo de interacción negativa con la vida marina (Bastien et al., 2018).

Es fundamental establecer restricciones de navegación y zonas de seguridad para evitar colisiones entre embarcaciones el proyecto.

Además, se debe prohibir la pesca de arrastre en las áreas del proyecto para evitar accidentes. La participación del sector pesquero en la planificación permite minimizar conflictos y asegurar un diseño que facilite la coexistencia de las actividades pesqueras y el proyecto eólico (Van Hoey, 2018).

La gestión de residuos es clave para minimizar la contaminación. Todos los desechos deben ser recolectados, reciclados o eliminados siguiendo regulaciones, como el principio de cero descargas utilizado en aguas alemanas, que obliga a retornar a tierra todo lo que no quede fijado en las estructuras offshore (Thomsen, 2012).

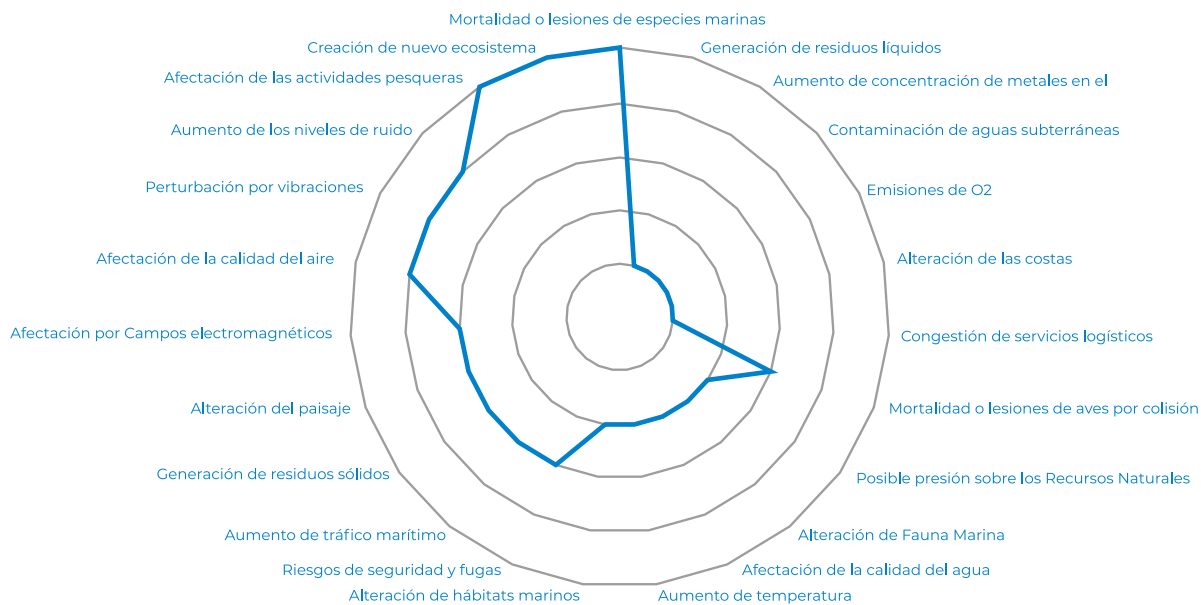
Finalmente, es esencial planificar puertos con suficiente capacidad para manejar los componentes del proyecto, establecer áreas de almacenamiento amplias, entre 60,000 y 70,000 m² para proyectos de aproximadamente 80 aerogeneradores (Thomsen, 2012), y evitar la construcción en áreas sensibles desde el punto de vista turístico o ecológico. La implementación de centros de coordinación de tráfico garantiza un flujo eficiente de materiales y personal, minimizando la congestión y los accidentes en zonas marítimas y terrestres. Además, la gestión eficiente del uso de combustibles y lubricantes, junto con la documentación detallada del consumo de recursos, contribuye a una operación más sostenible y a reducir la huella de carbono del proyecto (Thomsen, 2012).

3.3. Fase de Operación

La fase de operación implica una serie de actividades continuas que pueden generar impactos ambientales significativos tanto al medio físico y biótico como al medio antrópico.

En la Figura 5 se detallan los principales impactos identificados durante esta fase.

Figura 5. Principales impactos ambientales identificados en la Fase de Operación.



Fuente: elaboración propia.

Entre los principales impactos identificados se encuentra la mortalidad o lesiones de aves y especies marinas por colisiones con las palas de los aerogeneradores o con las embarcaciones utilizadas en actividades de mantenimiento. Las aves migratorias, en particular, enfrentan un riesgo elevado debido a la altura y extensión de las turbinas, mientras que mamíferos marinos y tortugas pueden sufrir lesiones graves al interactuar con las estructuras (Exo et al., 2003; Ibon et al., 2022).

Otro impacto importante es el aumento del ruido y las vibraciones, que afecta negativamente a la fauna marina. Este ruido proviene tanto de la operación de los aerogeneradores y los electrolizadores como de los sistemas de transmisión eléctrica y compresión, con efectos acumulativos que pueden alterar los patrones de comportamiento y migración de la fauna marina (European Industrial Gases Association, 2018).

Los cables submarinos generan campos electromagnéticos y aumentan la temperatura del

agua, lo que puede afectar a especies sensibles y alterar las condiciones térmicas del entorno. Adicionalmente, en caso de roturas, los cables podrían liberar sustancias contaminantes al lecho marino, afectando la calidad del agua y los ecosistemas locales (Bastien et al., 2018).

La desalinización del agua, necesaria para los sistemas de electrólisis genera salmuera, cuya descarga puede alterar la salinidad y la oxigenación del agua, impactando negativamente a los hábitats bentónicos y la fauna marina. Además, el uso de productos químicos en estos procesos puede incrementar la toxicidad del agua marina (Soliman, 2021).

El tráfico marítimo intensificado para mantenimiento incrementa el riesgo de colisiones con fauna marina y puede interferir con rutas de migración y actividades pesqueras. Esto último afecta tanto a la pesca industrial como a la artesanal, limitando el acceso a áreas tradicionales de pesca y provocando conflictos en el sector (Van Hoey, 2018).

En el ámbito terrestre, la instalación de sistemas de electrólisis onshore puede impactar el paisaje costero, transformar áreas en zonas industriales y generar riesgos de contaminación de acuíferos debido a posibles fugas de concentrados salinos y químicos tratados (Gurudeo, 2007).

Entre los impactos positivos se incluye la creación de nuevos ecosistemas debido a las estructuras marinas, que pueden actuar como

arrecifes artificiales, favoreciendo la biodiversidad local. Además, la generación de empleo en sectores relacionados con la energía renovable y el hidrógeno verde constituye un beneficio socioeconómico significativo (Congressional Research Service, 2024).

3.3.1. Medidas de Mitigación

Las medidas se centran en reducir los efectos negativos sobre la fauna marina, las aves, los recursos naturales y el entorno físico. Para prevenir la mortalidad de aves y murciélagos por colisión, se recomienda la instalación de sistemas disuasorios visuales y acústicos, como pintar una pala de los aerogeneradores de negro para aumentar su visibilidad, lo que ha demostrado reducir las colisiones hasta en un 70%, y el uso de señales acústicas o ultrasónicas para alejar especies vulnerables (Renewable Energy Wildlife Institute, 2024). Además, se propone la reducción o apagado selectivo de aerogeneradores en momentos críticos de alto riesgo, utilizando tecnología de radar e inteligencia artificial para detectar aves y activar estas medidas automáticamente.

Para minimizar el impacto en la fauna marina, se sugiere el enterramiento de cables submarinos para reducir la exposición a campos electromagnéticos, además de usar cables trifásicos AC o sistemas HVDC bipolares con blindajes adecuados (Bastien et al, 2018). También se recomienda implementar tomas de agua subsuperficiales (depende de la región) en los procesos de desalinización, lo que disminuye el riesgo de atrapamiento de organismos marinos durante la toma de agua (Missimera, 2017). En cuanto a la iluminación, se sugiere utilizar sensores de movimiento y temporizadores para controlar la duración de la exposición lumínica, minimizando su impacto en la vida silvestre y los hábitats marinos (Byrnes & Dunn, 2020).

En el manejo de residuos líquidos, se plantean sistemas de tratamiento de aguas residuales para eliminar impurezas generadas en los procesos operativos y evitar la contaminación del agua. Para la gestión de salmuera derivada de la desalinización, se proponen sistemas de difusión diseñados para diluir la concentración salina y minimizar sus efectos sobre los ecosistemas bentónicos (Missimera, 2017). En cuanto al ruido y las vibraciones generadas por los equipos de electrolisis y compresores, se recomienda el aislamiento acústico de los mismos, el uso de cabinas insonorizadas y el mantenimiento planificado para evitar la acumulación de impactos en el medio marino (Stocker, 2023).

Además, se sugiere un enfoque de planificación estratégica para fomentar la coexistencia entre proyectos y actividades pesqueras, estableciendo restricciones específicas para técnicas de pesca de alto impacto como el arrastre, pero evaluando opciones para permitir métodos de pesca pasiva (Van Hoey, 2018). Por último, se recomienda el diseño adecuado de instalaciones para el manejo seguro de hidrógeno, incluyendo códigos y normas estrictas que minimicen riesgos de fugas e incendios (Chris LaFleur, 2023).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En Uruguay, las zonas entre 20 y 100 metros de profundidad dentro de la ZEE son técnicamente viables para la instalación de proyectos eólicos offshore, sin embargo, hay que delimitar muy bien las áreas para evitar afectar zonas protegidas o de interés cultural.

En la fase de desarrollo los impactos ambientales se concentran en el medio biótico. Las actividades preliminares, como estudios geofísicos y geotécnicos, generan ruido y alteran el lecho marino, afectando a especies como mamíferos marinos, peces y tortugas. Los equipos utilizados en estas investigaciones son invasivos, y los niveles de ruido pueden perturbar los patrones de comunicación y migración de ballenas y delfines, así como interferir en el comportamiento de otras especies marinas dentro de la ZEE.

En la construcción, actividades como el dragado y la instalación de cables submarinos alteran la turbidez del agua y liberan sedimentos, afectando la calidad del hábitat marino. El uso de martillos hidráulicos para fundaciones genera ruido y presión sonora, perjudicando a mamíferos marinos, peces y cefalópodos. Estas actividades también incrementan el tráfico marítimo, aumentando el riesgo de colisiones y afectaciones a la fauna marina.

En la operación, uno de los impactos más relevantes es la mortalidad de aves por colisiones con aerogeneradores. Las vibraciones y ruidos submarinos también afectan a la fauna marina, alterando patrones de comportamiento, reproducción y migración. Además, la desalinización necesaria para la electrólisis produce efluentes de alta salinidad y residuos químicos que alteran la calidad del agua y pueden impactar ecosistemas locales. Los campos electromagnéticos generados por los cables submarinos, aunque con efectos menores, también pueden interferir en especies sensibles.

Para mitigar estos impactos, se proponen medidas que se han utilizado exitosamente en otros

proyectos, como el uso de cortinas de burbujas para reducir ruido, enterramiento de cables para minimizar campos electromagnéticos, y sistemas de tratamiento para gestionar adecuadamente los efluentes de desalinización. Además, estrategias como la planificación espacial y la implementación de tecnologías más eficientes buscan reducir impactos acumulativos y promover la sostenibilidad del entorno marino.

Los proyectos también pueden presentar impactos positivos. Las estructuras offshore actúan como arrecifes artificiales, fomentando la biodiversidad al ofrecer hábitats a diversas especies marinas. Este efecto positivo puede generar oportunidades económicas adicionales, como el ecoturismo y la investigación científica. Además, el desarrollo y operación de los proyectos offshore generan empleo en sectores como ingeniería, logística, mantenimiento y desarrollo tecnológico, impulsando industrias locales y creando un efecto multiplicador en la economía.

Este estudio sugiere un enfoque integral para el desarrollo sostenible de proyectos de energía eólica offshore y producción de hidrógeno verde en Uruguay. Las recomendaciones clave, partiendo de las lecciones aprendidas en otras regiones son:

4.1. Marco Regulatorio Integral:

En Uruguay, la falta de regulaciones específicas para este tipo de proyectos resalta la necesidad de establecer normativas claras desde las etapas iniciales de planificación. Se recomienda adoptar estándares internacionales y aprender de la experiencia de países en el sector, como Dinamarca y el Reino Unido. Dinamarca, con su planificación espacial marina y procesos de licitación competitivos, ha desarrollado un modelo exitoso para el crecimiento sostenible de la energía eólica offshore. Por su parte, el Reino Unido, mediante instituciones como el Crown Estate y políticas como el Offshore Wind Sector Deal, ha promovido la colaboración público-privada, reduciendo costos e incrementando la capacidad instalada (UK Government, 2020). Estados Unidos también ofrece un modelo basado en la planificación espacial y subastas de derechos gestionadas por el BOEM, equilibrando el desarrollo con la protección de otras actividades marinas (BOEM, 2024).

Para desarrollar proyectos offshore es fundamental obtener diversos permisos, incluyendo concesiones para el uso del espacio marítimo, autorizaciones para generación de

electricidad, acuerdos de conexión a la red, permisos ambientales y licencias relacionadas con trabajos en tierra y operación de infraestructura. La ausencia de un enfoque coordinado en la gestión de estos permisos puede provocar retrasos significativos, aumentando el riesgo y la complejidad del proyecto. Por ello, se requiere un sistema eficiente, con coordinación interinstitucional, simplificación de trámites y alineación con los objetivos nacionales, para garantizar el avance sostenible de estas iniciativas.

Una estrategia efectiva para optimizar los procesos de permisos es la implementación de una Ventanilla Única, que centraliza la gestión a través de un único punto de contacto. Este modelo, aplicado exitosamente en Dinamarca y Costa Rica, mejora la transparencia y reduce los tiempos de aprobación, permitiendo una mejor coordinación entre las autoridades. Sin transferir competencias legislativas, actúa como facilitador, guiando a los desarrolladores en un marco regulatorio claro y eficiente (GWEC & IRENA, 2023).

4.2. Planificación Espacial Marina (MSP, por su sigla en inglés):

Se recomienda que Uruguay inicie el desarrollo de proyectos offshore con la implementación de una MSP con un enfoque estratégico diseñado para regular los entornos marinos mediante la zonificación y la conciliación de diversos usos del mar. La MSP busca facilitar el desarrollo sostenible de actividades marítimas, minimizando conflictos y acelerando los procesos de permisos al involucrar a múltiples partes interesadas desde las etapas iniciales (GWEC & IRENA, 2023).

La MSP promueve la colaboración entre actores clave, como la industria energética, organismos gubernamentales, sectores de conservación y comunidades locales, para tomar decisiones coordinadas e informadas. Organismos internacionales como la UNESCO, en colaboración con la Unión Europea, han desarrollado guías de

referencia para su implementación, incluyendo estándares globales como el documento de 2009 sobre gestión basada en ecosistemas y la Guía Internacional de 2021 para la Planificación Espacial Marina (GWEC & IRENA, 2023).

Para Uruguay, se recomienda incluir consultas públicas desde las etapas iniciales de planificación para garantizar transparencia y consenso, especialmente con sectores como el pesquero. También se sugiere evaluar impactos acumulativos y desarrollar medidas específicas para mitigar efectos temporales como ruido, vibraciones y alteraciones en la calidad del agua y el aire, promoviendo un desarrollo marítimo equilibrado y sostenible.

4.3. Promoción de Investigaciones y Estudios:

Es crucial desarrollar líneas de base ambientales detalladas para evaluar los impactos en la ZEE de Uruguay. Se recomienda exigir estudios de línea de base a los desarrolladores y construir bases de

datos digitales consultables para mejorar la toma de decisiones y la planificación futura.

4.4. Formación y Capacitación:

Uruguay debe priorizar programas de formación en tecnologías de energía eólica offshore e hidrógeno verde para los equipos e instituciones que estarán evaluando estos proyectos, fortaleciendo competencias digitales y técnicas en la fuerza laboral. Soluciones tecnológicas como las desarrolladas por WindEurope y Amazon Web

Services pueden optimizar la gestión de permisos, mejorando la eficiencia y transparencia en los procesos regulatorios (GWEC & IRENA, 2023).

7. REFERENCIAS

ANCAP. (2014). Programa oceanográfico de caracterización del margen continental uruguayo. Zona Económica Exclusiva. Montevideo: Zona Editorial.

ANCAP. (2016). Campaña Oceanográfica para la Elaboración de un Estudio de Base Ambiental Regional de la ZEE de Uruguay. Montevideo: Advisian.

Bastien, T., Juan, B., Andrew, W., Gérard, T., Morgane, L., Nicolas, D., & Antoine, C. (2018). A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations, and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd.

Bureau of Ocean Energy Management. (BOEM). (2018). Geological and Geophysical (G&G) Surveys. U.S. Department of the Interior.

BVG Associates. (2019). Guide to an offshore wind farm. BVG Associates Limited.

Byrnes, T., & Dunn, R. (2020). Boating- and Shipping-Related Environmental Impacts and Ex-ample Management Measures: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse8110908>

Congressional Research Service. (2024). Potential Impacts of Offshore Wind on the Marine Ecosystem and Associated Species: Background and Issues for Congress. <https://crsreports.congress.gov>

Chris LaFleur, E. H. (2023). Chapter 16 - Safety of hydrogen for large-scale energy deployment in a decarbonized economy. *En Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99514-6.00011-X>

Condon, S. K. (2023). Environmental aspects of offshore H2 production from offshore wind farms. Trondheim: Department of Energy and Process Engineering at the Norwegian University of Science.

European Industrial Gases Association. (2018). Environmental impacts of hydrogen plants. Bruselas: EIGA.

Exo, K.-M., Huppopp, O., & Garthe, S. (2003). Birds and offshore wind farms: a hot topic in marine ecology. *Wader Study Group Bull*, Germany.

Global Wind Energy Council [GWEC]. (2022). Global offshore wind report 2022. Global Wind Energy Council. Obtenido de: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/06/GWEC-Global-Offshore-Wind-Report-2022.pdf>

Global Wind Energy Council [GWEC] & International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2023). Enabling frameworks for offshore wind scale up: Innovations in permitting. IRENA. Obtenido de: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Sep/IRENA_GWEC_Enabling_frameworks_offshore_wind_2023.pdf

Goldman Sachs International. (2022). Carbonomics. The clean hydrogen revolution. New York: The Goldman Sachs Group, Inc.

Gurudeo Anand Tularama, M. I. (2007). Environmental concerns of desalinating seawater using reverse osmosis. Australia: The Royal Society of Chemistry.

Ibon, G., Iratxe, M., Joxe Mikel, G., & al. (2022). Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms. *npj: Ocean Sustainability*.

Köller, J. (2006). *Offshore Wind Energy. Research on Environmental Impacts*. Berlin: Institute of Landscape Architecture and Environmental Planning, Department for Landscape Planning, and Environmental Impact Assessment, Berlin University of Technology.

Letcher, T. M. (2017). *Wind Energy Engineering. A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*. Londres: Academic Press.

Missimera, T. M., & Gilron, R. (2017). Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012>

Oisín, D., Rogério, C., & Coca, I. (2023). Impact of geophysical and geotechnical site investigation surveys on fish and shellfish. *Wind Energy Ireland (WEI): Blue Wise Marine*.

Renewable Energy Wildlife Institute. (2024). *Guide to wind energy & wildlife. Chapter 4: Minimizing collision risk to wildlife during operations*. Obtenido de <https://rewi.org/guide/chapters/04-minimizing-collision-risk-to-wildlife-during-operations/minimization-deterrence/>

Rodríguez, O. (2020). *Caracterización y estudio de parques eólicos offshore*. Universidad Politécnica de Catalunya.

Soliman, M. N., & Zribi, F. (2021). Energy consumption and environmental impact assessment of desalination plants and brine disposal strategies. *Institution of Chemical Engineers, Elsevier B.V.*

Stocker, M. (2023). Potential biological impacts of very low frequency acoustical energy produced by offshore wind turbine energy generation. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/10.0018602>

T. Aran Mooney, M. H. (2020). Acoustic impacts of offshore wind energy on fishery resources. *Oceanography: The Official Magazine of*. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.408>

TGS New Energy. (2024). *TGS New Energy*. Obtenido de 4C Offshore: <https://www.4coffshore.com/>

Thomsen, K. (2012). *Offshore wind: A comprehensive guide to successful offshore wind farm installation*. Tranbjerg: Academic Press.

UK Government (2020). *Offshore wind sector deal*. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Obtenido de: <https://www.gov.uk/government/publications/offshore-wind-sector-deal/offshore-wind-sector-deal>

Van Hoey, G. B. (2018). *Overview of the effects of offshore wind farms on fisheries and aquaculture*. Luxemburgo: Publications Office of the European Union.

Zaror, C. (2000). *Introducción a la Ingeniería Ambiental para la Industria de Procesos*. Concepción: Universidad de Concepción.

Zhou, Z. L. (2019). Effects of diesel oil spill on macrobenthic assemblages at the intertidal zone: A mesocosm experiment in situ. *Marine Environmental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104823>