



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

*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*

Autora:

Luisa Andreina Rivas Delgado

Maestría en Ingeniería de la Energía

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Montevideo

Agosto, 2024



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

*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.*

Autora:

Luisa Andreina Rivas Delgado

Tesis presentada con el objetivo de obtener el título de Magister en Ingeniería de la Energía

Tutor de tesis:

Dra. Ing. Alice Elizabeth González, Facultad de ingeniería

Cotutor de tesis:

Dr. Ing. Alejandro Gutiérrez, Facultad de ingeniería

Montevideo

Agosto, 2024

Integrantes del Tribunal de Defensa de Tesis

- 1.** Dr. Ing. José Cataldo
- 2.** Dr. Ing. Ignacio Franco
- 3.** Dra. Ing. Carolina García

Montevideo, Uruguay

agosto del 2024

Agradecimientos

A mi esposo Adrián, por apoyarme tantas veces mientras yo dedicaba horas a esta investigación, y a mi familia y amigos, que siempre me impulsaron a seguir adelante.

A mis tutores, Elizabeth y Alejandro, por haber sido parte vital de esta investigación, impulsándome a seguir, guiándome durante el proceso, aconsejándome y evitando que cayera en el “agujero de gusano”.

A la UDELAR y, en especial, a la Facultad de Ingeniería, por haberme brindado la oportunidad de cursar un posgrado con educación de alta calidad, con profesores excepcionales y un programa valioso para mi formación profesional.

A FICUS, por haberme introducido al mundo de la energía y el hidrógeno verde.

A ANCAP, por haber proporcionado información fundamental para la elaboración de este trabajo.

Y a Uruguay, por recibirme.

Resumen

Esta tesis identifica los posibles impactos ambientales asociados a la producción de hidrógeno verde en proyectos eólicos offshore en la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Uruguay. El hidrógeno verde es una opción viable para descarbonizar el sector energético, aunque su proceso de producción requiere un consumo significativo de recursos. La eficiencia de la energía eólica offshore, que depende de la calidad del recurso eólico, ofrece ventajas sobre la eólica onshore, como una mayor generación de electricidad, aunque enfrenta mayores costos y complejidades técnicas. Se estudiaron las actividades durante las etapas de desarrollo, construcción, operación y mantenimiento de este tipo de proyectos. Se presentaron las distintas configuraciones de proyectos y se plantearon dos posibles opciones relacionadas con la ubicación del sistema de electrólisis: un escenario donde el sistema de electrólisis se ubicaría sobre el agua y otro donde estaría en tierra. Posteriormente, se evaluaron investigaciones ambientales en proyectos eólicos offshore y de hidrógeno verde por electrólisis para identificar los principales impactos. A partir de estos resultados, se elaboró un listado de los posibles impactos ambientales que pueden ocurrir en cada fase del proyecto. Se analizaron estudios sobre la caracterización ambiental de la ZEE para determinar cuáles serían los impactos aplicables.

Los principales impactos identificados durante la fase de desarrollo están relacionados con los estudios geofísicos y geotécnicos, que pueden aumentar los niveles de ruido, generar vibraciones y alteraciones en el lecho marino, afectando la fauna y los hábitats marinos. En la fase de construcción, la construcción de fundaciones para los aerogeneradores es una de las actividades de mayor impacto; el dragado y la instalación de cables submarinos pueden llegar a suspender sedimentos que afectan la calidad del agua, aumentan los niveles de ruido y generan vibraciones que afectan la fauna marina en general. En la fase de operación, los impactos incluyen colisiones de aves con aerogeneradores y perturbaciones por aumento de los niveles de ruido submarino y ambiental. En el escenario en el que el proceso de electrólisis se realiza con agua de mar, la desalinización del agua genera impactos a partir de los efluentes de salmuera que pueden alterar la salinidad y la oxigenación del agua, aunque su uso es preferible al del agua dulce para conservar los recursos hídricos terrestres.

Los impactos relacionados con la producción y almacenamiento de hidrógeno incluyen el aumento de los niveles de ruido, el riesgo de fugas e incendios y el aumento de tráfico marítimo. También se identifican posibles efectos positivos, como la creación de nuevos ecosistemas artificiales en las bases de los aerogeneradores, que fomentan la biodiversidad, generan oportunidades económicas adicionales y crean empleo en diversas etapas del proyecto, impulsando el desarrollo económico.

Palabras clave

Hidrógeno Verde, Impacto Ambiental, Energía Eólica Offshore, Electrólisis, desalinización.

Abstract

This thesis identifies the potential environmental impacts associated with the production of green hydrogen in offshore wind projects in the Exclusive Economic Zone (EEZ) of Uruguay. Green hydrogen is a viable option for decarbonizing the energy sector, although its production process requires a significant consumption of resources. The efficiency of offshore wind energy, which depends on the quality of the wind resource, offers advantages over onshore wind, such as greater electricity generation, although it faces higher costs and technical complexities. The activities during the development, construction, operation, and maintenance stages of these projects were studied. Different project configurations were presented, and two feasible options related to the location of the electrolysis system were considered: one scenario where the electrolysis system would be located on the water and another where it would be on land. Subsequently, environmental research on offshore wind and green hydrogen projects through electrolysis was evaluated to identify the main impacts. Based on these results, a list of potential environmental impacts that may occur at each stage of the project was compiled. Studies on the environmental characterization of the EEZ were analyzed to determine which impacts would be applicable.

The main impacts identified during the development phase are related to geophysical and geotechnical studies, which can increase noise levels, generate vibrations, and cause alterations in the seabed, affecting marine fauna and habitats. In the construction phase, the construction of foundations for wind turbines is one of the most impactful activities; dredging and the installation of submarine cables can suspend sediments that affect water quality, increase noise levels, and generate vibrations that impact marine fauna in general. During the operation phase, impacts include bird collisions with wind turbines and disturbances due to increased levels of underwater and environmental noise. In the scenario where the electrolysis process uses seawater, desalination generates impacts from brine effluents that can alter the salinity and oxygenation of the water, although its use is preferable to freshwater to conserve terrestrial water resources. The impacts related to the production and storage of hydrogen include increased noise levels, the risk of leaks and fires, and increased maritime traffic.

Positive effects are also identified, such as the creation of new artificial ecosystems at the bases of the wind turbines, which foster biodiversity, generate additional economic opportunities, and create jobs in various stages of the project, driving economic development.

Keywords

Green Hydrogen, Environmental Impact, Offshore Wind Energy, Electrolysis, Desalination.

Alcance

La presente investigación se enfocará en la identificación bibliográfica general de los posibles impactos ambientales debidos a la producción de hidrógeno verde en proyectos eólicos offshore sobre las aguas de la Zona Económica Exclusiva del Uruguay. El análisis llegará hasta la fase de operación y mantenimiento y no contempla la exportación o uso final del producto.

Índice de contenido

Capítulo I. Introducción y Objetivos.....	1
1. Introducción.....	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo General.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
Capítulo II. Tecnologías y Procedimientos en la Producción de Energía Eólica Offshore y de Hidrógeno Verde: Métodos Constructivos, Operativos y Ambientales	4
3. Descripción de los aspectos teóricos básicos del hidrógeno verde y la generación eólica	4
3.1. ¿Qué es el hidrógeno?	4
3.2. Hidrógeno verde como combustible	4
3.3. Métodos de producción de hidrógeno: Los colores del hidrógeno	6
3.4. Energía Eólica.....	10
3.5. Tecnología de Aerogeneradores	15
3.6. Energía Eólica offshore	18
4. Descripción de las tecnologías de producción de energía eólica offshore y principales métodos constructivos asociados	22
4.1. Etapa de Desarrollo	22
4.1.1. Concesión del espacio marino	22
4.1.2. Estudio de Impacto Ambiental	22
4.1.3. Estudios del recurso eólico y datos metoceanicos	24
4.1.4. Estudios geológicos e hidrológicos	25
4.1.5. Ingeniería y consultoría.....	25
4.2. Aerogeneradores offshore	26
4.3. Fundaciones o Cimentaciones	34
4.4. Red de cableado submarino de media tensión	40
4.5. Subestación Transformadora	42
4.6. Cables submarinos de alta tensión.....	42
4.7. Obras complementarias al proyecto	47
5. Tecnologías de producción de hidrógeno verde y principales métodos constructivos asociados	48
5.1. Electrólisis Alcalina (AEL).....	48
5.2. Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones (PEM)	49
5.3. Electrólisis de Óxido Sólido	49
5.4. Configuración del sistema de electrolizadores.....	50
5.4.1. Configuración del sistema de electrolizadores offshore	51

5.4.2.	Configuración del sistema de electrolizadores en tierra	52
5.4.3.	Configuración del sistema de electrólisis dentro del aerogenerador	53
5.5.	Tecnología del Sistema de Electrolizadores	55
5.6.	Membrana de electrolizadores PEM	56
5.7.	Dimensionamiento del sistema de electrolizadores	58
5.8.	Unidad de desalinización de agua	58
5.9.	Sistemas de transporte y compresión del hidrógeno	60
5.10.	Sistema de almacenamiento	62
6.	Procedimientos de operación y mantenimiento (O&M) de las plantas eólicas offshore y plantas de electrólisis PEM	64
6.1.	Parque eólico offshore.....	64
6.1.1.	Mantenimiento Planificado	64
6.1.2.	Mantenimiento No Planificado	65
6.1.3.	Reparación de Componentes Mayores.....	65
6.1.4.	Coordinación de Tráfico de Buques	65
6.1.5.	Gestión Técnica.....	66
6.1.6.	Centro de Operaciones.....	66
6.2.	Sistema de electrólisis	66
6.2.1.	Suministro de agua.....	66
6.2.2.	Preparación del agua.....	66
6.2.3.	Electrólisis	67
6.2.4.	Inspección y Mantenimiento Regular	68
6.2.5.	Gestión de la Seguridad	69
6.2.6.	Mantenimiento de Equipos Auxiliares	69
6.2.7.	Gestión de Residuos	69
Capítulo III. Identificación de Impactos Ambientales de la Producción de Hidrógeno Verde a partir de Proyectos Eólicos Offshore		69
7.	Principales impactos ambientales identificados en proyectos eólicos offshore y de producción de hidrógeno verde	69
7.1.	Resumen del documento “Offshore Wind Energy: Research on Environmental Impacts” de Köller et al (2006)	70
7.2.	Resumen del documento “Towards understanding environmental and cumulative impacts of floating wind farms: Lessons learned from the fixed-bottom offshore wind farms” de Fatemeh Rezaei (2023).....	73
7.3.	Resumen del documento “Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms” de Ibon et al (2022)	74
7.4.	Resumen del documento “Environmental, Health, Safety, and Social Management of Green Hydrogen in Latin America and the Caribbean: A scoping study” de la División de Energía del Banco Interamericano de Desarrollo Chiara Signoria y Marco Barlettani (2023)	76

7.5.	Resumen del documento “Identificación de aspectos ambientales, sectoriales y territoriales para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde en toda su cadena de valor”, del GIZ, Ministerio de Energía de Chile y Servicio de Evaluación Ambiental de Chile	78
7.6.	Resumen del documento “Environmental Assessment of Electrolyzers for Hydrogen Gas Production” de Camila Sundin (2019).	80
8.	Análisis de los impactos ambientales generales en cada fase del proyecto	81
8.1.	Fase de Desarrollo	82
8.2.	Fase de Construcción.....	89
8.3.	Fase de Operación	109
Capítulo IV. Evaluación de un proyecto hipotético ubicado en la Zona Económica Exclusiva (ZEE) del Uruguay		122
9.	Análisis de los estudios de caracterización ambiental que se han hecho en la ZEE del Uruguay.....	122
9.1.	Medio Físico	124
9.2.	Medio Biótico.....	127
9.2.1.	Plancton	127
9.2.2.	Bentos	128
9.2.3.	Necton	129
9.2.4.	Peces	130
9.2.5.	Aves	131
9.2.6.	Reptiles	133
9.2.7.	Mamíferos Marinos	133
9.2.8.	Cefalópodos	135
9.3.	Medio Antrópico	136
9.3.1.	Actividades y Recursos de Pesca:	136
9.3.2.	Otras Actividades Antrópicas	138
9.3.3.	Áreas de conservación	140
9.4.	Marco legal ambiental	141
10.	Resultado del análisis de los principales impactos ambientales y medidas propuestas en un proyecto ubicado en la Zona Económica Exclusiva del Uruguay	142
10.1.	Fase de desarrollo.....	144
10.2.	Fase de construcción	147
10.3.	Fase de Operación	156
Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones Generales		169
11.	Conclusiones.....	169
12.	Recomendaciones Generales	173
Bibliografía.....		180

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama esquemático del flujo de aire a una velocidad V a través del área A.....	13
Figura 2. Tubo de flujo de ley de Betz.....	13
Figura 3. Mapa eólico mundial: velocidad media del viento en m/s a 100 m de altura.....	15
Figura 4. Sustentación Aerodinámica.....	16
Figura 5. Componentes de un aerogenerador.....	16
Figura 6. Evolución de la potencia y diámetro de rotor de los aerogeneradores a lo largo de los años.....	18
Figura 7. Foto aérea ilustrativa de un parque eólico offshore.....	20
Figura 8. Distribución básica de operación de un parque eólico offshore.....	26
Figura 9. Tecnologías de Fundaciones fijas.....	37
Figura 10. Tecnologías de fundaciones flotantes.....	38
Figura 11. Efecto estela que se produce detrás de los aerogeneradores.....	39
Figura 12. Espaciado mínimo entre aerogeneradores.....	39
Figura 13. Representación gráfica de una distribución de aerogeneradores al tresbolillo.....	40
Figura 14. Conexión en media tensión de los distintos strings de aerogeneradores hasta la subestación elevadora.....	41
Figura 15. Imagen referencia de subestación elevadora en alta mar.....	42
Figura 16. Tendido del cable mediante ROVs.....	47
Figura 17. Esquema simplificado de electrólisis alcalina.....	48
Figura 18. Esquema simplificado de electrólisis PEM.....	49
Figura 19. Esquema simplificado de electrólisis de óxido sólido.....	50
Figura 20. Configuración del sistema de electrolizadores offshore.....	51
Figura 21. Configuración del sistema de electrolizadores en tierra.....	53
Figura 22. Configuración del sistema de electrólisis dentro del aerogenerador.....	53
Figura 23. Principales componentes del sistema de configuración de electrólisis offshore centralizada e individual.....	55
Figura 24. Descripción general del electrolizador de agua PEM típico.....	57
Figura 25. Diagrama básico del proceso de ósmosis inversa.....	59
Figura 26. Imagen referencial del área de almacenamiento de repuestos en puertos.....	65
Figura 27. Diagrama de proceso de producción de sistema de electrólisis.....	66
Figura 28. Metodología propuesta para la evaluación de ocurrencia de Impactos Ambientales.....	82
Figura 29. Principales impactos ambientales identificados en la Fase de Desarrollo.....	87
Figura 30. Principal Medio afectado y Factores Ambientales más impactados en la Fase de Desarrollo.....	88
Figura 31. Principales impactos ambientales identificados en la Fase de Construcción.....	107
Figura 32. Principales factores ambientales afectados en la etapa de construcción.....	109
Figura 33. Principales impactos ambientales identificados en la Fase de Operación.....	119
Figura 34. Principales factores ambientales afectados en la Fase de Operación.....	121
Figura 35. Recuadro con indicación de la ZEE del Uruguay.....	122
Figura 36. Áreas de la ZEE del Uruguay.....	123
Figura 37. Regiones de la ZEE del Uruguay.....	124
Figura 38. Zonas con mayor riqueza en diversidad de especies de Bentos.....	128
Figura 39. Áreas con presencia de pe.....	130

Figura 40. Zonas de alimentación de peces.....	130
Figura 41. Zonas de reproducción de peces.	131
Figura 42. Áreas con mayor y menor avistamiento de aves.	132
Figura 43. Foto del Petrel de Barba Blanca (<i>Procellaria aequinoctialis</i>).....	132
Figura 44. Áreas con mayor riqueza de presencia de tortugas. Naranja: Área 15, Zona con mayor riqueza; Amarillo: presencia de tortugas; Amarillo claro: áreas 1 y 3 sin presencia de tortuga cabezona.	133
Figura 45. Áreas con mayor riqueza de presencia de Mamíferos Marinos. Naranja: Área 9, Zona con mayor riqueza; Amarillo: presencia de Mamíferos Marinos; Zona de Talud, mayor riqueza de especies..	134
Figura 46. <i>Orcinus orca</i>	134
Figura 47. <i>Globicephala melas</i>	134
Figura 48. <i>Otaria flavescens</i>	134
Figura 49. <i>Illex argentinus</i>	135
Figura 50. <i>Loligo sanpaulensis</i>	135
Figura 51. <i>Onychoteuthis banksii</i>	135
Figura 52. Áreas con presencia de Cefalópodos. <i>Illex argentinus</i> se encuentra en todas las áreas, Región 1: <i>Loligo sanpaulensis</i> en la plataforma continental; Región 2: <i>Omastrephes bartrami</i> a más de 2.000 m.	136
Figura 53. Área de operación de la flota de arrastre costero.....	137
Figura 54. Área de operación de la flota de arrastre de merluza.....	137
Figura 55. Zonas de tránsito y alijo.	139
Figura 56. Ubicación de áreas y cables submarinos activos.	139
Figura 57. Zonas dentro de la ZEE que se encuentran ingresadas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP).....	140
Figura 58. Delimitación de la Zona factible para proyectos eólicos offshore dentro de la ZEE.	143
Figura 59. Principales factores ambientales impactados durante la fase de desarrollo para la ZEE.....	144
Figura 60. Principales impactos ambientales identificados durante la fase de construcción para la ZEE.	148
Figura 61. Principales impactos ambientales identificados durante la fase de operación para la ZEE.....	156

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparación de energía por unidad de masa de los diferentes combustibles.	5
Tabla 2. Tipos de procesos utilizados para la obtención de hidrógeno, principales características y categoría de colores.	7
Tabla 3. Escalas espaciales de sistemas eólicos y una muestra de Tipos de viento.	11
Tabla 4. Descripción de los principales componentes de un aerogenerador.	17
Tabla 5. Principales elementos de comparación entre eólica onshore y eólica offshore.	19
Tabla 6. Principales fabricantes y modelos de aerogeneradores para el año 2024.	27
Tabla 7. Principales características de cada tipo de fundación o cimentación de estructura fija.	34
Tabla 8. Principales características de cada tipo de fundación o cimentación de estructura flotante.	37
Tabla 9. Principales características de las conexiones CC y AC.	43
Tabla 10. Ventajas y desventajas de cada tipo de tecnología de electrólisis.	55
Tabla 11. Principales fabricantes y modelos de electrolizadores PEM.	57
Tabla 12. Tipos de compresores y sus características.	61
Tabla 13. Descripción de los distintos tipos de almacenamiento de hidrógeno.	63
Tabla 14. Resumen de los principales impactos ambientales y medidas presentadas en el estudio de Identificación de aspectos ambientales, sectoriales y territoriales para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde en toda su cadena de valor.	79
Tabla 15. Actividades que pueden ocurrir en la fase de desarrollo del proyecto, con sus posibles impactos y factores ambientales relevantes.	83
Tabla 16. Actividades que pueden ocurrir en fase de construcción del proyecto con sus impactos y factores ambientales relevantes.	90
Tabla 17. Actividades que pueden ocurrir en fase de operación del proyecto con sus impactos y factores ambientales relevantes.	110
Tabla 18. Resumen de resultados de estudios sobre el Medio Abiótico obtenidos a lo largo de la campaña de investigación en todo el ámbito de la ZEE de Uruguay realizada por ANCAP (2016).	124

Capítulo I. Introducción y Objetivos

1. Introducción

En los últimos años, la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de encontrar fuentes de energía sostenibles han impulsado el interés en tecnologías de energía renovable. Entre éstas, la energía eólica offshore y la producción de hidrógeno verde destacan por su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y satisfacer la demanda energética global de manera limpia y eficiente. Esta tesis se centra en la exploración y evaluación de estas tecnologías en el contexto específico de la Zona Económica Exclusiva de Uruguay para identificar sus posibles impactos ambientales.

El hidrógeno verde es el producido mediante electrólisis del agua utilizando electricidad generada a partir de fuentes renovables. Este elemento se presenta como un combustible de bajas emisiones que puede ser utilizado para una variedad de aplicaciones industriales, de transporte y de almacenamiento de energía. A diferencia del hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles, el hidrógeno verde no genera emisiones de carbono durante su producción, lo que lo convierte en una opción clave para la descarbonización de diversos sectores económicos. Su capacidad para almacenar energía de forma eficiente y su potencial para integrarse en las infraestructuras energéticas existentes lo hacen especialmente atractivo.

Por otro lado, la energía eólica offshore, que aprovecha los vientos marinos, ofrece una generación de energía eléctrica con bajas emisiones de CO₂ asociadas, en comparación con las fuentes de energía convencionales. La tecnología eólica offshore ha avanzado considerablemente en los últimos años, con mejoras en la eficiencia de los aerogeneradores y en las técnicas de construcción y mantenimiento.

Uruguay, con su extensa costa y su historial de liderazgo en energías renovables, puede presentar un escenario ideal para la implementación de proyectos de hidrógeno verde y energía eólica offshore. La diversificación de la matriz energética del país mediante la incorporación de estas tecnologías no solo contribuiría a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también fortalecería la seguridad energética y podría generar oportunidades económicas significativas a través de la creación de empleo y el desarrollo de nuevas industrias.

El objetivo principal de esta tesis es identificar los posibles impactos ambientales asociados a la producción de hidrógeno verde en proyectos offshore dentro de la Zona Económica Exclusiva de Uruguay; para lograr este objetivo, se plantea un análisis bibliográfico que abarca áreas claves de los procesos.

Se realizará una revisión detallada de los conceptos fundamentales relacionados con la generación eólica y el hidrógeno verde. Esto incluye una explicación de qué es la energía eólica, que es el hidrógeno, los distintos métodos de producción y los diferentes tipos de hidrógeno (verde, azul, gris, etc.), así como una descripción de la tecnología de aerogeneradores y la energía eólica offshore.

La tesis abordará las tecnologías específicas utilizadas en la producción de energía eólica offshore y la producción de hidrógeno verde. Esto incluye los métodos constructivos asociados, además de las diferentes fases en el proceso de desarrollo

como la concesión del espacio marino, los estudios de impacto ambiental, los estudios geológicos e hidrológicos, y los aspectos de ingeniería y consultoría.

Se analizarán los procedimientos de operación y mantenimiento de las plantas eólicas offshore y las plantas de electrólisis. Este análisis incluirá tanto el mantenimiento planificado como el no planificado, la reparación de componentes mayores, la coordinación de tráfico de buques, y la gestión técnica y de operaciones.

Se identificarán los principales impactos ambientales asociados con proyectos eólicos offshore y de producción de hidrógeno verde en otras localizaciones a nivel mundial, partiendo de una revisión bibliográfica de reportes, informes e investigaciones que hayan abordado estos temas, para posteriormente vincularlo al contexto uruguayo.

Se realizará un análisis de los estudios de caracterización ambiental que se han hecho en las aguas de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Uruguay, con un enfoque en el medio físico, biótico y antrópico, con el fin de pasar a una evaluación de cuáles serán los posibles principales impactos ambientales identificados para la zona de estudio y cuáles serán los factores ambientales que más serán impactados.

Finalmente, la tesis propondrá medidas generales de mitigación para los impactos ambientales identificados, en las fases de desarrollo, construcción y operación de este tipo de proyectos, contribuyendo a la formulación de estrategias para el desarrollo de proyectos en Uruguay.

La importancia de este estudio radica en proporcionar un análisis detallado y contextualizado de las tecnologías de offshore en un país que está explorando estas alternativas en su plan de desarrollo. Al abordar, tanto los aspectos técnicos como los ambientales, esta tesis busca ofrecer una visión integral que pueda servir de base para la toma de decisiones informadas por parte de los responsables de políticas, los desarrolladores de proyectos y otros actores clave.

El enfoque en Uruguay como caso de estudio permite explorar las particularidades y oportunidades que presenta este país en términos de recursos naturales, infraestructura existente y marco regulatorio. La experiencia y los resultados obtenidos pueden servir como referencia para otros proyectos de la región con condiciones similares, ampliando el impacto y la aplicabilidad de los hallazgos de esta tesis.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Identificar los posibles principales impactos ambientales asociados a la producción de hidrógeno verde a partir de proyectos eólicos offshore en la Zona Económica Exclusiva de Uruguay.

2.2. Objetivos específicos

1. Describir los aspectos teóricos básicos de la generación eólica y el hidrógeno verde
2. Describir las tecnologías de producción de energía eólica offshore y de producción de hidrógeno verde e identificar sus principales métodos constructivos asociados, como también sus procedimientos de operación y mantenimiento.
3. Identificar y analizar los principales estudios de caracterización y análisis de impactos ambientales de proyectos eólicos offshore y de producción de hidrógeno verde hechos a nivel internacional
4. Analizar los estudios de caracterización ambiental hechos en la Zona Económica Exclusiva de Uruguay.
5. Identificar los principales impactos ambientales asociados a la producción de hidrógeno verde a partir de energía eólica offshore en la Zona Económica Exclusiva de Uruguay y proponer medidas de mitigación aplicables.

Capítulo II. Tecnologías y Procedimientos en la Producción de Energía Eólica Offshore y de Hidrógeno Verde: Métodos Constructivos, Operativos y Ambientales

3. Descripción de los aspectos teóricos básicos del hidrógeno verde y la generación eólica

3.1. ¿Qué es el hidrógeno?

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, después del oxígeno y el silicio (Casanova, 2022, pág. 4). Su presencia es predominante en el agua o en los hidrocarburos cuando se une al carbono en moléculas orgánicas (como hidrocarburos y componentes de origen vegetal y animal).

La forma más básica de hidrógeno es el hidrógeno gaseoso. Es un gas transparente, insípido y no tiene olor. La densidad del hidrógeno es muy baja, siendo su peso molecular el más pequeño que se encuentra en la naturaleza; en términos de densidad, es más ligero que el aire, teniendo en condiciones de 0 °C y una presión de 1 atmósfera, una densidad de 0,089 gramos por litro. Al comparar su densidad con la del aire, se observa que la densidad del hidrógeno es aproximadamente 1/14 parte de la densidad del aire (Casanova, 2022, pág. 4), y es justamente esta la mayor dificultad para lograr su almacenamiento y transporte, ya que ocupa grandes volúmenes para almacenar una carga energética baja.

El hidrógeno puede ser licuado, aunque lograrlo es un proceso complejo, principalmente por la alta cantidad de energía que se requiere. Para lograr este cambio de estado, (partiendo de una temperatura de 0 °C y una presión de 1 atmósfera) se necesita enfriar el hidrógeno gaseoso hasta alcanzar una temperatura de -253 °C. Sin embargo, es importante tener en cuenta que mantener el hidrógeno en su estado líquido y prevenir su evaporación demandará el uso de sistemas adicionales capaces de mantener esta temperatura constante.

La solubilidad del hidrógeno en líquidos comunes es relativamente baja y está influenciada por factores como la temperatura y la presión. Ésta generalmente disminuye con el aumento de la temperatura, pero aumenta con la presión. Se expresa como el volumen máximo disuelto en un volumen de disolvente a una temperatura específica. La ley de Henry, formulada en 1803, establece que la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión parcial del gas a una temperatura y presión dadas, por lo que, en las mismas condiciones, la solubilidad del hidrógeno al 100 % en el líquido es 50 veces superior al hidrógeno al 2 % (Casanova, 2022, pág. 5). La solubilidad del hidrógeno es alta en metales como níquel, paladio y molibdeno. Además, dado el bajo peso molecular del gas hidrógeno, su permeabilidad resulta considerablemente alta. Es capaz de atravesar tubos de caucho y látex a temperatura ambiente, y puede incluso penetrar películas metálicas como paladio, níquel y acero cuando se encuentran a elevadas temperaturas.

3.2. Hidrógeno verde como combustible

En los últimos años se ha posicionado el hidrógeno como una fuente de combustible en diversos campos. Su uso como combustible tiene la ventaja de producir energía sin generar emisiones de dióxido de carbono ni otros contaminantes atmosféricos, siempre que su proceso de obtención sea considerado “verde”, lo que lo convierte en una opción más limpia en comparación con los combustibles fósiles tradicionales.

De acuerdo con Casanova (2022), cada tipo de combustible libera una cantidad establecida de energía al reaccionar con oxígeno y formar agua. Esta energía se evalúa utilizando el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior del combustible. La diferencia entre estos es conocida como "calor de vaporización"; refleja la energía requerida para vaporizar un combustible líquido y convertir agua en vapor.

El hidrógeno destaca por tener la relación energía-peso más alta entre todos los combustibles, debido a su naturaleza ligera y su carencia de átomos de carbono pesados. En comparación con los combustibles de hidrocarburos comunes como la gasolina, el diésel, el metano y el propano, el hidrógeno libera aproximadamente 2,5 veces más energía por unidad de masa durante su reacción, como se puede observar en la Tabla 1. Por ende, para una carga determinada, la cantidad de hidrógeno requerida es solo alrededor de un tercio de lo necesario en combustibles de hidrocarburos.

Tabla 1. Comparación de energía por unidad de masa de los diferentes combustibles. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Casanova (2022)

Combustible	HHV (a 25 °C y 1 atm)	LHV (a 25 °C y 1 atm)
Hidrógeno	61.000 Btu/lb (141.86 kJ/g)	51.500 Btu/lb (119.93 kJ/g)
Metano	24.000 Btu/lb (55.53 kJ/g)	21.500 Btu/lb (50.02 kJ/g)
Propano	21.650 Btu/lb (50.36 kJ/g)	19.600 Btu/lb (45.6 kJ/g)
Gasolina	20.360 Btu/lb (47.5 kJ/g)	19.000 Btu/lb (44.5 kJ/g)
Diesel	19.240 Btu/lb (44.8 kJ/g)	18.250 Btu/lb (42.5 kJ/g)
Metanol	8.580 Btu/lb (19.96 kJ/g)	7.760 Btu/lb (18.05 kJ/g)

El alto contenido energético del hidrógeno también implica que las explosiones que involucren hidrógeno pueden ser aproximadamente 2,5 veces más potentes que las de los combustibles de hidrocarburos convencionales. No obstante, debido a la relación inversa entre la energía de combustión y la duración de la explosión, los incendios de hidrógeno tienden a extinguirse mucho más rápidamente que los de hidrocarburos (Casanova, 2022, pág. 8).

A pesar de las características que hacen que el hidrógeno sea atractivo para los ecosistemas energéticos, como combustible, vector energético, o como materia prima, el hidrógeno en su forma ambiente es un gas altamente reactivo con una densidad de energía muy baja (contenido de energía por unidad de volumen), lo que implica la necesidad de un manejo, transporte y distribución cuidadosos, así como el uso de sistemas de alta presión normalmente para aplicaciones finales (Goldmand Sachs International, 2022). Además, las vías de producción dominantes actuales para el hidrógeno son intensivas en emisiones de carbono, ya que dependen principalmente del uso de combustibles fósiles.

Debido a las condiciones y riesgos específicos del hidrógeno, su almacenamiento es uno de los elementos más importantes a considerar en todo el proceso, pues debido a su naturaleza molecular única presenta desafíos ya que, al ser la molécula más pequeña y ligera, tiene una tendencia natural a escapar a través de los poros microscópicos de los materiales convencionales utilizados en los tanques de almacenamiento. Además, las altas presiones requeridas para lograr una densidad de almacenamiento adecuada, aumenta el riesgo de fugas y explosiones en los tanques convencionales. Por último, el hidrógeno tiende a difundirse y reaccionar con muchos materiales, lo que puede provocar corrosión y debilitamiento de los materiales del tanque, aumentando el riesgo de fugas y fallas estructurales.

De acuerdo con Qian Cheng (2023, pág. 2), generalmente hay cinco tipos de tanques de hidrógeno según los diferentes materiales utilizados, siendo los tanques de Tipo III (forrados de metal y envueltos con material compuesto) y Tipo IV (forrados de polímero y envueltos con material compuesto) los utilizados para vehículos. El forro metálico del tanque de Tipo III generalmente está hecho de aleaciones de aluminio. Más adelante en este trabajo, en la sección 5.10 de este trabajo se ampliará información sobre el almacenamiento.

3.3. Métodos de producción de hidrógeno: Los colores del hidrógeno

El hidrógeno difícilmente se encuentra en su forma diatómica en la naturaleza, como se explicó en el apartado anterior, lo que conlleva diferentes procesos para su obtención. Para ello, se ha establecido una categorización de colores basada en el método de producción, siendo los más destacados: hidrógeno gris, hidrógeno azul e hidrógeno verde.

- **Hidrógeno gris:** Se obtiene a través de la gasificación del carbón o la reformación del gas natural. Actualmente, esta es la técnica más común para la producción de hidrógeno, representando aproximadamente el 95 % de su generación (Casanova, 2022, pág. 15). No obstante, este proceso emite grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera.
- **Hidrógeno azul:** Sigue un proceso similar al del hidrógeno gris, utilizando la gasificación del carbón o la reformación del gas natural. La diferencia está en la captura de CO_2 emitido al ambiente, mediante la instalación de una unidad de captura de carbono (CCS - Carbon Capture System), lo que reduce las emisiones asociadas. En promedio, se puede capturar cerca del 95 % de las emisiones.
- **Hidrógeno verde:** se produce al descomponer el agua (H_2O) en dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno. Este proceso emplea un electrolizador, que separa los componentes, y requiere energía eléctrica de fuentes renovables para su funcionamiento. A diferencia de los métodos anteriores, la producción de hidrógeno verde es libre de emisiones, generando únicamente oxígeno como subproducto.
- **Hidrógeno turquesa:** se produce mediante la utilización de gas natural como materia prima, pero sin generar emisiones de CO_2 . Este proceso se lleva a cabo a través de la pirólisis, donde el carbono presente en el metano se convierte en carbono sólido, conocido como "carbono negro". Este carbono sólido es más fácil de almacenar que el CO_2 en forma gaseosa y tiene su propio mercado, lo que genera ingresos adicionales. Actualmente, el hidrógeno turquesa se encuentra en una fase piloto de desarrollo.

A continuación, en la Tabla 2 se presenta la descripción de los tipos de procesos utilizados para la obtención de hidrógeno, principales características y categoría de color:

Tabla 2. Tipos de procesos utilizados para la obtención de hidrógeno, principales características y categoría de colores. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Goldman Sachs International (2022)

Categoría de color	Tecnología de proceso				Eficiencia (energía útil obtenida en forma de hidrógeno y la energía total contenida en la materia prima)	Agua necesaria
	Proceso	Materia prima	Descripción	kg CO ₂ e/kg H ₂	% LHV	L/ kg H ₂
Marrón	Gasificación	Carbón, Biomasa, Petróleo, Residuos Sólidos Urbanos	El carbón se calienta en un proceso de pirólisis a 400 °C, vaporizando componentes volátiles de la materia prima en H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ . Luego se agrega oxígeno en la cámara de combustión y el carbón se gasifica, liberando gases, vapores de alquitrán y residuos sólidos (CO y H ₂). La reacción de cambio de agua-gas convierte el CO en CO ₂ y H ₂ , y luego ocurre la purificación mediante metanación o PSA.	19,5	70-80 %	9
Turquesa	Pirólisis	Gas Natural	El gas natural se calienta sin combustión con aire, dividiéndose en hidrógeno y carbono sólido. Hay cuatro tipos: pirólisis lenta, rápida, instantánea y de microondas.		50-70 %	NA
Gris	Reformado de vapor metano (SMR)	Gas Natural	El gas natural (metano) y vapor de alta temperatura se mezclan con un catalizador, que puede ser de níquel para producir hidrógeno, CO y una pequeña cantidad de CO ₂ . Por lo general, el calor se genera mediante la combustión de gas combustible. Ocurre una reacción de cambio de agua-gas donde el CO y el vapor se	9 a 11	64 %	4,5

Categoría de color	Tecnología de proceso				Eficiencia (energía útil obtenida en forma de hidrógeno y la energía total contenida en la materia prima)	Agua necesaria
	Proceso	Materia prima	Descripción	kg CO ₂ e/kg H ₂	% LHV	L/ kg H ₂
			reaccionan aún más para producir CO ₂ y más hidrógeno. En el paso final, el hidrógeno se separa del gas de escape mediante adsorción selectiva.			
	Reformado autotérmico (ATR)		La reforma autotérmica (ATR) combina la reacción endotérmica de reformado con vapor y la reacción exotérmica de oxidación. La materia prima, gas natural, vapor o a veces CO y oxígeno, se mezclan antes de precalentarse. En la zona de combustión, se produce una oxidación parcial que genera una mezcla de CO ₂ e hidrógeno. En la zona catalítica, los gases que salen de la zona de combustión alcanzan el equilibrio. Una reacción de cambio de agua-gas ocurre después de la ATR, donde el CO reacciona con vapor para producir más hidrógeno y CO ₂ .	9	78-82 %	
Azul	Reformado de vapor metano (SMR) + CCUS	Gas Natural	Proceso similar al SMR anterior, pero con un sistema integrado de captura de carbono agregado. La captura de CO ₂ se puede realizar en tres corrientes	0,9-2,5		4,5

Categoría de color	Tecnología de proceso				Eficiencia (energía útil obtenida en forma de hidrógeno y la energía total contenida en la materia prima)	Agua necesaria
	Proceso	Materia prima	Descripción	kg CO ₂ e/kg H ₂	% LHV	L/ kg H ₂
	Reformado autotérmico (ATR) + CCUS		Proceso similar al ATR anterior. La captura de carbono suele ser más efectiva en ATR en comparación con SMR dada la mayor concentración de CO ₂ en la corriente.	0,5-1,35		NA
Verde	Electrólisis Alcalina (AEL)	Energía Renovable Agua	Para todos estos tipos de electrólisis, la corriente directa pasa a través de una sustancia iónica que produce una reacción química en los electrodos. Los electrodos se sumergen en un electrolito y se separan por un medio donde los iones de hidrógeno se mueven hacia el cátodo para formar H ₂ y los receptores recogen este hidrógeno y oxígeno (otro electrodo) en formas gaseosas.	0	52-59 %	9 a 15
	Electrólisis con Membrana de Intercambio protónico (PEM)	Energía Renovable Agua		0	60-75 %	9 a 15
	Electrólisis de Óxido Sólido	Energía Renovable Vapor		0	74-81 %	9 a 15

El hidrógeno verde destaca entre los otros tipos, como una opción superior debido a su proceso de producción de menor impacto y su potencial para descarbonizar sectores clave de la economía. Producido mediante la electrólisis del agua utilizando energía renovable, el hidrógeno verde es libre de emisiones de carbono tanto en su producción como en su uso, aunque cabe destacar, que, de acuerdo con lo mencionado en la Tabla 2 es importante tener en cuenta el consumo de agua de su proceso y la eficiencia de conversión del proceso.

La electrólisis del agua se realiza mediante un equipo llamado electrolizador, el cual es un dispositivo que recibe electricidad de corriente continua (CC) y agua desmineralizada, y separa los átomos de hidrógeno y oxígeno de la molécula de agua mediante una reacción química, generando oxígeno e hidrógeno de alta pureza (Calado & Castro, 2023, pág. 4). Aunque diferentes tecnologías de electrólisis funcionan de manera ligeramente diferente, todas tienen un ánodo y un cátodo separados por un electrolito.

Tal como fue explicado, el hidrógeno verde tiene que ser producido con energía eléctrica 100 % limpia, proveniente principalmente de fuentes renovables como eólica, solar, geotérmica, entre otras, sin embargo, éste trabajo se enfocará en la energía eólica como fuente de producción, y especialmente en la eólica offshore.

3.4. Energía Eólica

La energía eólica es la energía que se deriva del viento, aprovechando su energía cinética para su conversión inicial en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica mediante el uso de aerogeneradores. A lo largo de los siglos, el viento ha sido utilizado para actividades como la molienda de granos o el bombeo de agua. Sin embargo, según Letcher (2017, pág. 128), desde la década de 1980 hasta la actualidad, ha emergido como una fuente crucial de generación de electricidad a gran escala.

Para comprender mejor el concepto de energía eólica, es esencial entender que el viento es el aire atmosférico en movimiento respecto a la superficie de la Tierra. La velocidad del aire en movimiento determina la fuerza dinámica del viento y está vinculada a su energía cinética, siendo esta última alimentada por la radiación solar. La radiación solar, a su vez, calienta la superficie terrestre de manera desigual, siendo más intensa en los trópicos y más débil en latitudes más altas (Letcher, 2017, pág. 17). Este calentamiento diferencial, junto con otros procesos térmicos como la evaporación, la precipitación y las variaciones en la absorción de la radiación superficial, generan diferentes escalas espaciales y temporales de fenómenos atmosféricos. Estos procesos, combinados con las fuerzas dinámicas derivadas de la rotación de la Tierra, dan lugar a una variedad de vientos clasificados según su escala espacial y los mecanismos físicos de generación.

En la Tabla 3 se detallan las principales características de los vientos clasificados según su escala espacial.

Tabla 3. Escalas espaciales de sistemas eólicos y una muestra de Tipos de viento. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Letcher (2017).

Escalas espaciales	Tipos de Viento	Escala de longitud	Características
Escala planetaria	Circulación global	10.000 km	Ejemplos de circulaciones planetarias incluyen flujos zonales sostenidos, como la corriente en chorro, los vientos alisios y los chorros polares
Escala sinóptica	Sistemas meteorológicos	1.000 km	
Escala mesoescalar	Circulaciones regionales orográficas o inducidas térmicamente	10-100 km	incluyen circulaciones orográficas y térmicas inducidas
Escala micro	Local, modulación del flujo, ráfagas en la capa límite	100-1.000 m	incluyen el encauzamiento del flujo por la topografía urbana, así como fenómenos de tormentas convectivas de submesoescala

Letcher (2017) destaca que la comprensión de estas escalas espaciales de la atmósfera es fundamental para el desarrollo de modelos meteorológicos, la predicción precisa del clima, como también para determinar las mejores formas de aprovechar la energía del viento, ya que las estadísticas de las ocurrencias de viento observadas definen los climas del viento en diferentes regiones.

Más del 80 % de la masa de la atmósfera se encuentra concentrada en la tropósfera, (ubicada en los primeros 10 km de la atmósfera) por lo que, desde el punto de vista de la generación de energía eólica, la zona de interés se encuentra en la zona más cercana a la superficie terrestre de la tropósfera, la cual se denomina capa límite atmosférica.

La capa límite atmosférica es una región crítica en la atmósfera que se establece en estrecha relación con la superficie terrestre, extendiéndose desde la superficie misma hasta una altitud de aproximadamente 2 km (Barreiro, 2023, pág. 6), la cual puede variar en función de diversos factores, incluida la topografía del terreno y las condiciones atmosféricas. En esta capa, el comportamiento del flujo de aire difiere notablemente en comparación con las capas superiores de la atmósfera, ya que se ve directamente influenciado por la interacción con la superficie terrestre y por los procesos de mezcla turbulenta que ocurren en su interior.

La capa límite atmosférica se divide en dos zonas distintas: la capa superficial, que abarca alturas de entre 50 m y 100 m, donde las tensiones rasantes en la superficie son casi constantes y la estructura vertical del flujo está determinada principalmente por estas tensiones y por el gradiente vertical de temperatura; y la región superior, que se extiende entre 500 m y 1.000 m, donde las tensiones rasantes varían y la estructura del flujo está influenciada por las tensiones en la superficie, el gradiente vertical de temperatura y la rotación de la Tierra. Entonces, cuando el aire se mueve sobre la

superficie de la Tierra, está sujeto a la fricción y a la rugosidad del terreno, lo que ralentiza su movimiento cerca del suelo. A medida que el aire asciende, se aleja de la influencia directa del terreno y experimenta menos fricción, lo que le permite moverse con mayor libertad y, por lo tanto, a una velocidad mayor.

Comprender estos aspectos es necesario para responder a la pregunta de cuánta energía hay en el viento y cuánta será posible extraer, ya que justo dentro de la capa límite atmosférica es donde se instalarán los aerogeneradores. La energía eólica entonces depende de la velocidad y masa del aire a una altura determinada, cuantificando la energía del viento que fluye a través de un área de interés por unidad de tiempo. La energía cinética del viento es una función de la masa y la velocidad del fluido y su representación matemática se puede simplificar en la siguiente Ecuación 1:

$$Ec = \frac{1}{2} * m * v^2$$

Ecuación 1. Ecuación de la energía cinética del viento

Donde:

Ec= Energía cinética

m= masa del aire en movimiento

v= Velocidad del viento

La masa del aire en movimiento se determina utilizando la densidad del aire (ρ) y el volumen de aire que está pasando a través de un área determinada.

La potencia del viento es la tasa de flujo de energía cinética. En la Ecuación 2 a continuación se exhibe de forma ya simplificada la fórmula de cálculo de la potencia del viento:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

Ecuación 2. Ecuación simplificada de Potencia del viento

Donde:

P= Potencia del viento

ρ = Densidad del viento

A= Área de barrida de las palas del aerogenerador

v= Velocidad del viento

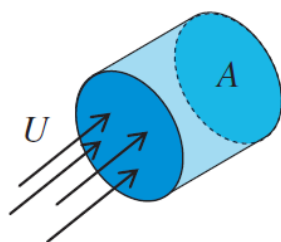


Figura 1. Diagrama esquemático del flujo de aire a una velocidad V a través del área A .

En la Ecuación 2 se observa una dependencia cúbica con la velocidad del viento y lineal con el resto de las variables, lo que explica por qué la velocidad del viento es uno de los factores principales para considerar en la energía eólica.

La relación de la potencia respecto al área implica una dependencia directa con el área de barrido de las palas del aerogenerador, resaltando las ventajas de las palas de un aerogenerador más largas para los resultados de la generación.

Sin embargo, no toda esta potencia estará disponible para su utilización y conversión en electricidad. La eficiencia en la extracción de energía eólica se cuantifica mediante el Coeficiente de Potencia (CP), que es la relación entre la potencia extraída por el aerogenerador y la potencia total del recurso eólico, tal como se muestra en la Ecuación 3:

$$Pt = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * CP$$

Ecuación 3. Ecuación simplificada de Potencia del viento considerando el CP

Existe un límite teórico máximo para el CP, conocido como el Límite de Betz, que establece que de la energía cinética contenida en el flujo de aire que atraviesa la superficie del área barrida por las palas, sólo una parte puede ser convertida en energía eléctrica, sin importar el tipo de aerogenerador, estableciendo que la eficiencia máxima alcanzable es del 59 %, siendo esta la mejor eficiencia que un aerogenerador convencional puede lograr al extraer energía del viento. En la Figura 2 se representa gráficamente el volumen de control utilizado en el análisis de la Ley de Betz.

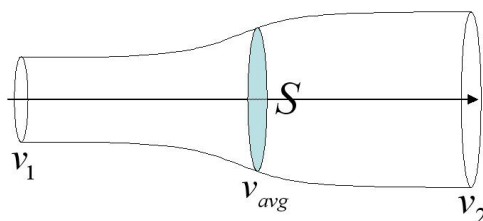


Figura 2. Tubo de flujo de ley de Betz. Fuente: Gutiérrez (2011)

Otro de los parámetros claves en la energía eólica es el Factor de capacidad (FC) se utiliza para evaluar cuánta energía efectiva se genera en comparación con la capacidad nominal de un sistema de energía eólica. El FC es una medida de la eficiencia en la

generación de energía en relación con las condiciones ambientales ideales. El Factor de Capacidad refleja el porcentaje de energía que un aerogenerador realmente genera respecto a la energía máxima que podría producir si operara a su capacidad nominal durante todo el año. Este indicador es esencial para comprender cuánta energía se puede esperar que genere un sistema de energía eólica en condiciones reales en comparación con su capacidad máxima teórica.

La Ecuación 4 muestra el cálculo del Factor de Capacidad (CF), expresándose matemáticamente de la siguiente manera:

$$CF = \frac{E_{actual}}{E_{ideal}}$$

Ecuación 4. Ecuación del Factor de Capacidad

Donde:

Eactual= es la energía eléctrica realmente producida por el sistema durante el período de tiempo dado.

Eideal= es la cantidad máxima de energía que podría haberse producido si el sistema hubiera estado funcionando a su máxima capacidad durante todo el tiempo.

Un factor de capacidad típico para un proyecto económicamente viable es del 30 % (Letcher, 2017, pág. 23), con la posibilidad de alcanzar alrededor del 50 % en regiones con un recurso eólico excepcional. Esto resalta que la eficiencia de la generación de energía eólica varía significativamente según las características del recurso eólico disponible en una ubicación determinada, como también, influye poder alcanzar mayores alturas de aerogeneradores y rotores de mayor diámetro, llevando a que los desarrolladores de proyectos estén continuamente en búsqueda de los lugares con las condiciones de viento más favorables para la instalación de proyectos, tanto en velocidades de viento, como en espacio para instalación de los equipos.

A modo de ejemplo, en la Figura 3 se muestra como las áreas offshore de la mayoría de las regiones presentan mayores velocidades de viento, lo que ofrece un recurso eólico significativo. Sin embargo, el aprovechamiento de la energía del viento no depende únicamente de la alta velocidad del viento, sino también de la capacidad tecnológica y las condiciones específicas para su conversión eficiente en energía utilizable.

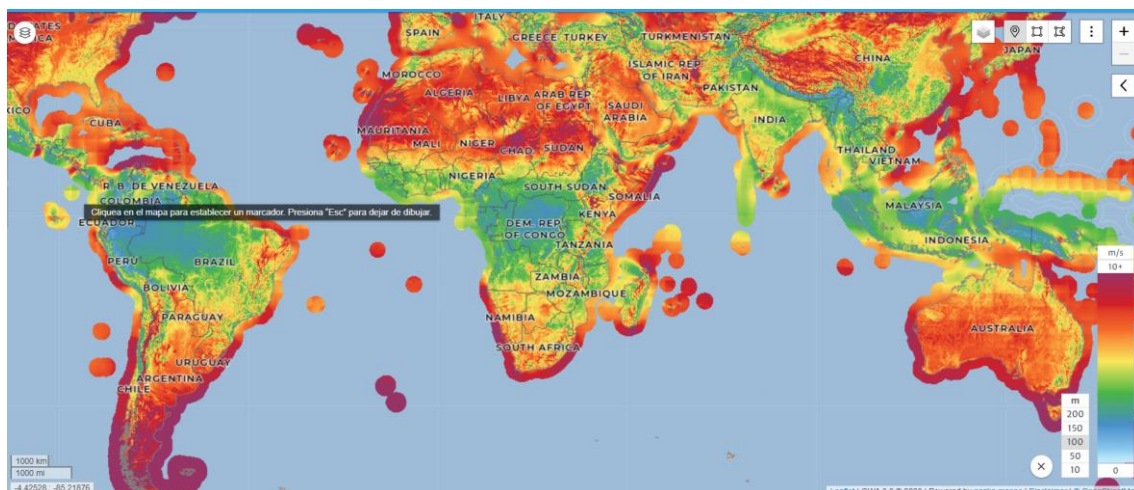


Figura 3. Mapa eólico mundial: velocidad media del viento en m/s a 100 m de altura. Fuente: Global Wind Atlas (2023)

3.5. Tecnología de Aerogeneradores

La tecnología de aerogeneradores involucra aspectos como aerodinámica, mecánica, dinámica de estructuras, meteorología y también ingeniería eléctrica que aborda la generación, transmisión e integración de los aerogeneradores en el sistema eléctrico.

De acuerdo con Letcher (2017, pág. 145), la tecnología de los aerogeneradores se ha convertido en la tecnología de energía renovable más prometedora y confiable en la actualidad. Se han utilizado desde la década de 1980, cuando contaban con una potencia de aproximadamente 500 kilovatios; hoy se están instalando aerogeneradores de 8 y 10 MW, con algunos de 20 MW en fases de investigación y desarrollo; pasando a lo largo de los años a un diseño impulsado por optimización dentro del régimen operativo y el entorno del mercado. Los diseños de aerogeneradores parten desde sistemas de velocidad fija controlados pasivamente y con trenes de transmisión con cajas de engranajes, a sistemas de velocidad variable controlados activamente, con o sin cajas de engranajes, utilizando las últimas tecnologías en electrónica de potencia, aerodinámica y diseños de tren de transmisión mecánica (Letcher, 2017, pág. 146).

Existen dos tipos de aerogeneradores, clasificados como de sustentación o de arrastre, dependiendo de qué fuerza generada por el viento se utiliza como fuerza motriz. Para comprender el principio de funcionamiento de un aerogenerador, se evaluarán los más comunes en uso hoy en día, es decir, los de sustentación. A diferencia de los aerogeneradores de resistencia, en los de sustentación el viento fluye por ambas caras de la pala, que tienen perfiles geométricos diferentes, lo que crea una zona de baja presión en la parte superior en comparación con la presión en la parte inferior. Esta diferencia de presiones genera una fuerza denominada sustentación aerodinámica sobre la superficie de la pala, de manera similar a lo que ocurre en las alas de los aviones, tal como se observa en la Figura 4.

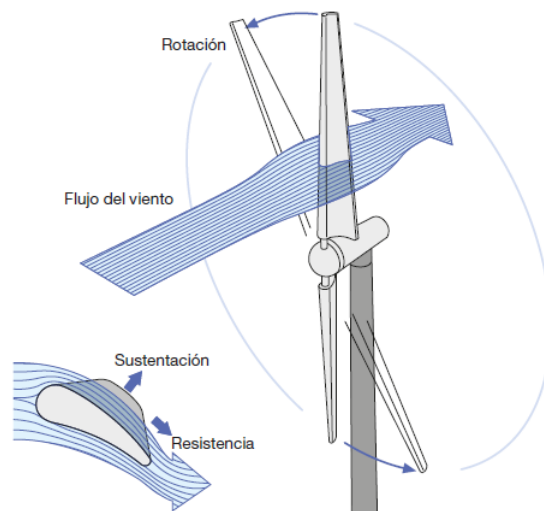


Figura 4. Sustentación Aerodinámica. Fuente: ABB (2023, pág. 14).

Un aerogenerador está formado por tres partes principales, la torre, que consta de dos o más tubos de acero atornillados entre sí; la góndola, donde se aloja el generador, que se instala en la parte superior de la torre y el rotor, que consta de tres palas conectadas a un eje central en la góndola. En la Figura 5 se pueden observar los principales componentes.

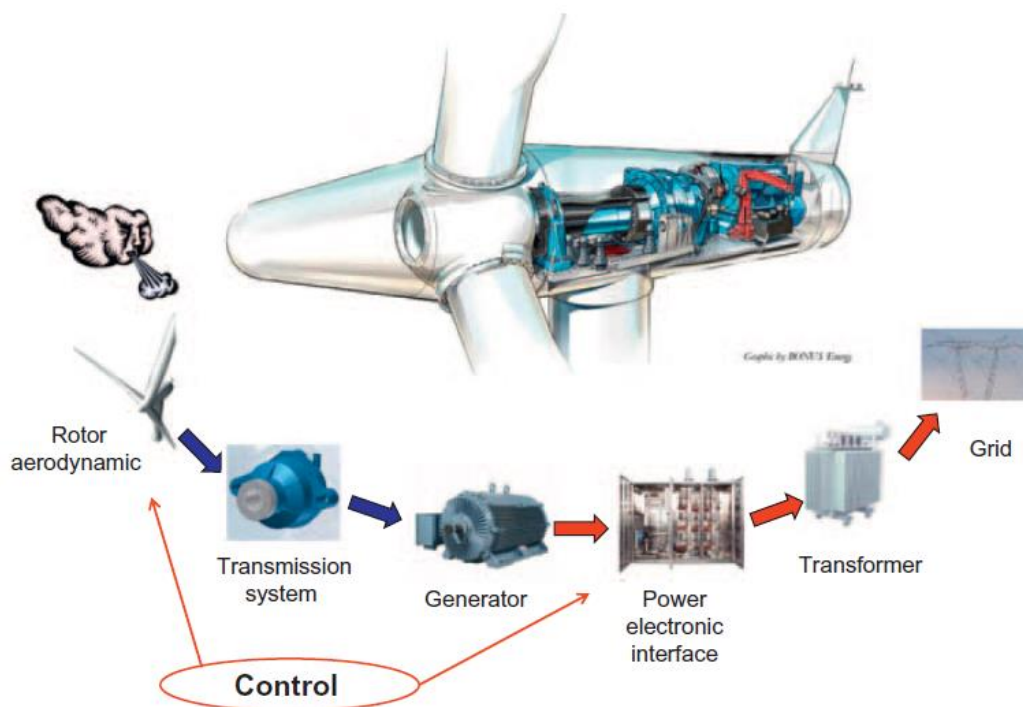


Figura 5. Componentes de un aerogenerador. Fuente: (Letcher, 2017, pág. 146)

A continuación, en la Tabla 4 se describen las principales características de los componentes:

Tabla 4. Descripción de los principales componentes de un aerogenerador

Componente	Característica
Rotor aerodinámico	Es el componente fundamental en la captura de la energía del viento y su conversión en energía mecánica cinética. El rotor se compone principalmente de un cubo y palas. Estas palas están fabricadas típicamente con mantas de fibra de vidrio impregnadas con poliéster. En los aerogeneradores más antiguos, las palas pueden estar fijas al cubo, mientras que, en las más modernas, las palas pueden girar alrededor de su eje longitudinal.
Sistema de transmisión	Se encarga de transferir la potencia mecánica cinética generada por el rotor aerodinámico al generador, con componentes como los frenos mecánicos y la caja de cambios. Los frenos mecánicos actúan como un sistema de respaldo para el frenado aerodinámico del aerogenerador y como freno de estacionamiento cuando el aerogenerador se detiene. La caja multiplicadora, por su parte, tiene como principal función aumentar la velocidad de rotación, convirtiendo la rotación lenta y de alto par del rotor en una rotación más rápida del eje del generador. Las cajas multiplicadoras son una parte crítica de los aerogeneradores y que, debido a las variaciones en los tamaños de los aerogeneradores y las fluctuaciones en la velocidad del viento, a menudo son el componente más propenso a fallos. Letcher (2017) menciona que, en algunas tecnologías más nuevas, se han eliminado las cajas de cambios al diseñar generadores multipolares que se adaptan a la velocidad del rotor.
Generador	El generador es un componente electromecánico que se encarga de convertir la potencia mecánica en potencia eléctrica, contiene dos componentes fundamentales, el estator y el rotor. El estator es una carcasa estacionaria que contiene bobinas de alambre dispuestas en un patrón específico. El rotor es la parte giratoria del generador y es responsable del campo magnético del generador. El rotor puede ser un imán permanente o un electromagneto, lo que implica que genera un campo magnético en el rotor que gira junto con él. La rotación del rotor y su campo magnético pasan por las bobinas del estator, lo que induce una tensión en los terminales del estator. Existen dos tipos principales de generadores utilizados en la industria de aerogeneradores: el generador síncrono y el generador asíncrono (de inducción); estos se explican más adelante, en el Capítulo 4.
Interfaz electrónica	En esta componente se convierte la potencia mecánica generada por el aerogenerador en potencia eléctrica que se integra en la red eléctrica. En el lado del generador, la interfaz electrónica asegura que la velocidad de rotación del aerogenerador se ajuste continuamente para extraer la máxima potencia del viento. Por otro lado, en el lado de la red eléctrica, la interfaz electrónica debe cumplir con los códigos de red independientemente de la velocidad del viento, controlando la potencia activa y reactiva, así como la frecuencia y el voltaje.
Sistema de control	Existen dos enfoques de control: el control pasivo y el control activo. El control pasivo, utilizado en situaciones como la pérdida de eficiencia aerodinámica del rotor, permite que las palas "automáticamente" pierdan eficiencia cuando la velocidad del viento supera un cierto nivel crítico. Por

Componente	Característica
	otro lado, el control activo emplea medios eléctricos, mecánicos, hidráulicos o neumáticos, junto con transductores para detectar variables como la velocidad del viento, la velocidad del rotor, la potencia activa y reactiva, y la tensión y frecuencia de conexión del aerogenerador. El objetivo general del control activo de aerogeneradores es maximizar la producción de energía y reducir las cargas estructurales en los componentes mecánicos para extender su vida útil y reducir costos.

A lo largo de los años, los fabricantes han buscado alcanzar mayores alturas en los aerogeneradores, tal como se observa en la Figura 6, principalmente por dos razones: en primer lugar, tal como se explicó en la sección 3.4, a medida que se incrementa la altura, los aerogeneradores pueden acceder a velocidades de viento más altas y consistentes, ya que dentro de la capa límite atmosférica la fluctuación de las velocidades del viento disminuye con la altura, permitiendo un flujo más suave y rápido. Esto resulta en una mayor captura de energía eólica y una producción más constante.

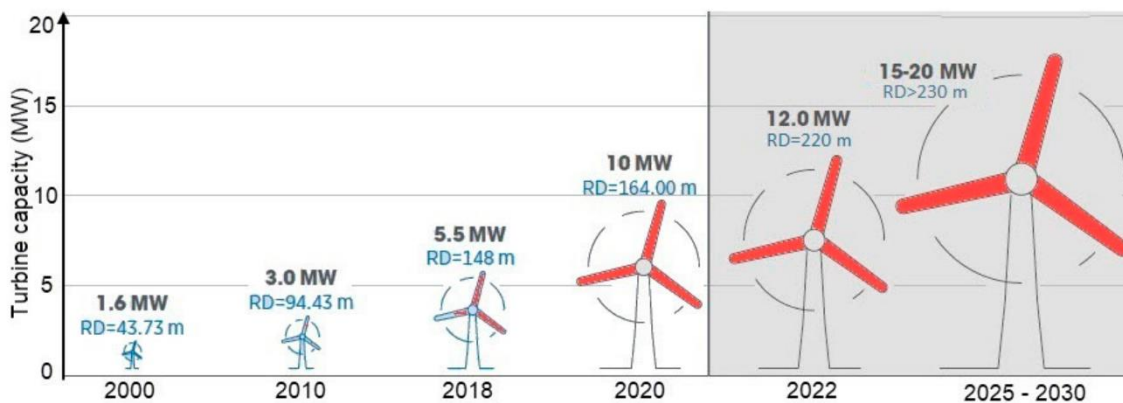


Figura 6. Evolución de la potencia y diámetro de rotor de los aerogeneradores a lo largo de los años. Fuente: Bošnjakovi et al. (2022)

En segundo lugar, los aerogeneradores más altos pueden tener palas más grandes, lo que aumenta su eficiencia y reduce los costos unitarios de instalación y de generación de energía a largo plazo. Se destaca que los aerogeneradores de mayor porte, como 10 MW en adelante, hasta ahora pueden ser instalados exclusivamente en explotaciones eólicas offshore, dados que las dimensiones de estos resultan en una restricción infranqueable para el transporte en tierra.

3.6. Energía eólica offshore

La energía eólica offshore se refiere a la generación de electricidad a partir de aerogeneradores instalados en masas de agua, normalmente en océanos o grandes lagos. A diferencia de la energía eólica terrestre, que involucra aerogeneradores ubicados en tierra, los parques eólicos marinos se construyen en áreas costeras o en alta mar (En la Tabla 5 se resumen las principales comparaciones entre la eólica onshore y offshore). Sin embargo, las fundaciones o cimientos son uno de los principales

elementos diferenciales entre ambas tecnologías de instalación, pues la mayoría de los parques eólicos terrestres se basan en una zapata como base y los parques eólicos marítimos requieren una cimentación mucho más compleja debido a la necesidad de anclarse en el fondo marino.

Los aerogeneradores offshore pueden estar cimentados en monopilotes, estructuras de gravedad o jackets, dependiendo de la profundidad del lecho marino, como se explicará en la sección 4.3. Esto aumenta la complejidad de la instalación y requiere una inversión significativamente mayor, así como un mantenimiento costoso. Como se indicó en la sección 3.5, una de las principales características de la tecnología de los parques eólico offshore consiste en que se utilizan aerogeneradores de mayores dimensiones y potencia nominal, esto tiene como consecuencia mayores factores de capacidad ya que se capta el flujo de energía cinética en zonas de mayor altura. Se pueden tener algunas configuraciones en las que, la inversión adicional y los desafíos técnicos en algunas ocasiones puedan ser rentables debido a la mayor capacidad de generación eléctrica de los parques marítimos.

Tabla 5. Principales elementos de comparación entre eólica onshore y eólica offshore Fuente: Elaboración propia

Característica	Eólica Onshore	Eólica Offshore
Recurso eólico	Fuerte afectación del ciclo diario, recurso ampliamente evaluado. Limitación en la instalación de aerogeneradores más grandes reduciendo la capacidad de generación onshore.	Flujo de viento más uniforme y menos afectado por la topografía del terreno. Recurso con escasa y nula evaluación (medidas) en alturas del entorno de las requeridas para la evaluación. Estudios de evaluación del recurso más costosos, ya sea por la necesidad de instalar tanto torres como sistemas de medición remota offshore. Posibilidad de instalar aerogeneradores de gran altura y diámetro de rotor, lo que aumenta la capacidad de generación de energía.
Espacio	Espacio limitado por tierra	Normalmente grandes extensiones de espacio sin limitaciones
Madurez tecnología	Tecnología ampliamente desarrollada e instalada a nivel mundial y distribuida en todo el planeta.	Amplia experiencia en la instalación, pero acotada a algunos países; de alcance más limitado.
Costos	Menos costosa que la eólica offshore	Más costosa que la onshore, por los altos costos de construcción de las fundaciones o cimientos.

Operación y Mantenimiento	Operación y mantenimiento sencillo y accesible	Operaciones costosas por las condiciones de operación en mar
Impacto ambiental	Puede causar impacto visual y acústico a comunidades cercanas.	Menor impacto visual y acústico para poblaciones. Mayores impactos para la fauna marina.

Los parques eólicos offshore consisten en múltiples aerogeneradores que se instalan sobre cimientos fijos o estructuras flotantes ancladas al lecho marino, tal como se observa en la Figura 7. El proceso de transformación de la energía es el mismo que el de aerogeneradores onshore, normalmente la electricidad se transmite a través de cables submarinos a una subestación en tierra, donde se conecta a la red eléctrica para su distribución. Con normalidad los aerogeneradores están especialmente diseñados para resistir el duro entorno marino, incluidos los fuertes vientos, las olas y la corrosión.



Figura 7. Foto aérea ilustrativa de un parque eólico offshore. Fuente: Thomsen (2012, pág. 14)

Los parques eólicos offshore presentan ventajas significativas al reducir los impactos visuales, dependiendo de la distancia a la costa. Letcher (2017, pág. 479) menciona que, a mayores distancias se disminuye el impacto visual. Al estar ubicados en el mar, se minimiza la interacción con la fauna terrestre y se disminuyen los impactos visuales para los residentes cercanos (sin embargo, es crucial estudiar la interacción del parque con la fauna marina). Esta ubicación permite que los parques eólicos offshore sean diseñados a mayor escala, aprovechando el espacio disponible en el agua, en contraste con las limitaciones del espacio terrestre para la instalación de parques eólicos.

A medida que la industria eólica ha avanzado, se han desarrollado tecnologías y técnicas específicas para la energía eólica offshore. Esto incluye aerogeneradores más resistentes, estructuras de soporte adaptadas al entorno marino y sistemas de transmisión de energía eficientes.

Es importante mencionar que la selección ideal del sitio para la instalación de un parque eólico offshore dependerá de muchos factores. De acuerdo con Letcher (2017, pág.

225), dentro de los principales se debe identificar que el sitio seleccionado cuente con las siguientes características:

- Recurso eólico: Área con condiciones ideales de recurso eólico para su transformación en energía eléctrica.
- Aspectos marinos: Los aspectos marinos, como la profundidad del agua, la distribución de olas en el sitio, los datos de corrientes y mareas, la exposición a las olas y el transporte de sedimentos, la identificación de problemas en el lecho marino o los materiales que se deben utilizar y la necesidad de protección de éstos contra la erosión.
- Temas ambientales: Es necesario identificar los posibles impactos en el entorno biológico, como mamíferos marinos, aves marinas que utilizan el área de forma regular, aves migratorias, peces, etc. También se deben considerar otros aspectos, como el efecto en la flora y fauna durante la construcción (por ejemplo, aumento de los niveles de ruido debido a la colocación de pilotes o ruido operativo) y el campo electromagnético generado por el cable submarino. En cuanto al entorno humano, se deben evaluar los cambios en el paisaje y afectación al sector pesquero. Además, se deben tener en cuenta aspectos de arqueología marina, como posibles hallazgos arqueológicos de naufragios, entre otros.
- Exportación de energía/conexión a la red: Uno de los factores decisivos importantes es la ubicación de las conexiones a la red en tierra. El factor determinante incluye la longitud del cable submarino requerido, que depende del diseño de los aerogeneradores, la ubicación de la subestación, la identificación de la ruta del cable de exportación (punto de entrada a tierra), la evaluación de riesgos de los cables enterrados y las opciones de transformador: corriente alterna (CA) o corriente continua (CC).
- Aspectos económicos: Aunque no quedan dudas de las ventajas ambientales que tienen las energías renovables frente a las energías convencionales que utilizan combustibles fósiles, el aspecto económico es muy importante para avanzar con las decisiones de inversión, por lo que la elección del sitio debe también realizarse en función de alcanzar los costos de producción de electricidad más bajos. Los aspectos que más impactan en los factores económicos son: profundidad del agua, distancia desde la costa, velocidad del viento en el sitio, instalaciones portuarias cercanas al sitio, condiciones socioeconómicas y acceso a mano de obra calificada, ubicación de la red nacional y área de influencia para el desarrollo propuesto (Letcher, 2017, pág. 226).
- Posibles impactos en la navegación: se debe evaluar si es necesario establecer una zona de exclusión debido a la pesca, la navegación o las operaciones militares. Los cables que conectan los parques eólicos y los cables de exportación de energía pueden llegar a enterrarse a profundidades de 2 a 3 metros para evitar el riesgo de enredarse con redes de pesca.

Tal como se mencionó, una vez identificado el sitio preliminar se deben realizar una serie de estudios que serán parte del desarrollo de los proyectos

4. Descripción de las tecnologías de producción de energía eólica offshore y principales métodos constructivos asociados

Previo a entrar en la descripción de las tecnologías para la energía eólica offshore, se describirán las principales actividades involucradas en la fase de planificación y desarrollo, destacando los principales estudios con potencial de causar impactos ambientales.

4.1. Etapa de Desarrollo

De acuerdo con BVG Associates (2019, pág. 17), la fase de desarrollo de un proyecto eólico offshore abarca todas las actividades necesarias hasta alcanzar el cierre financiero o de realizar pedidos firmes para proceder con la construcción del proyecto. Esto incluye actividades de planificación, como la evaluación del impacto ambiental, y actividades para definir los aspectos de diseño e ingeniería. Esta fase incluye principalmente los siguientes pasos:

4.1.1. Concesión del espacio marino

El arrendamiento del lecho marino o concesión de bloque marítimo para parques eólicos offshore en Uruguay dentro de la ZEE debe ser gestionado a través del Poder Ejecutivo (Ley N° 17033, República Oriental del Uruguay, 1998) a través de procesos de licitación. La Ley 17.033 menciona en su Artículo 5 que *"La República tiene derechos de soberanía en la zona económica exclusiva para los fines de exploración, explotación, conservación y administración de los recursos naturales, tanto vivos como no vivos, de las aguas suprayacentes al lecho y del lecho y subsuelo del mar, y con respecto a otras actividades con miras a la exploración y explotación económicas de la zona, tales como la producción de energía derivada del agua, de las corrientes y de los vientos."* (Ley N° 17033, República Oriental del Uruguay, 1998).

4.1.2. Estudio de Impacto Ambiental

Con base en la legislación uruguaya, la Ley 16.466 (República Oriental del Uruguay, 1994) y el Decreto 349/005 (República Oriental del Uruguay, 2005) mencionan las actividades que por su naturaleza deben conllevar, previo a su construcción, un estudio de impacto ambiental o el otorgamiento de una Autorización Ambiental Previa (AAP), quedando este tipo de proyectos dentro de este alcance, como se explicará con mayor detalle en la sección 9.4. Para determinar los impactos, se debe llevar a cabo una completa serie de estudios in situ.

El estudio de impacto ambiental de este tipo de proyectos puede llegar a tener un alcance tan amplio y específico, que podría incluir consultores locales e internacionales. Además, se recomienda abordar desde las etapas de planificación, las consultas de grupos de interés especial y de la comunidad local, permitiendo a las partes interesadas y al público expresar sus opiniones y preocupaciones. De acuerdo con BVG Associates (2019, pág. 19), el proceso del estudio de impacto ambiental puede tardar hasta tres años en completarse, siendo el elemento más crítico de esta fase el tiempo necesario para el levantamiento de líneas de base y para completar el trabajo de estudios ambientales específicos.

Los estudios in situ y el levantamiento de línea base de los proyectos pueden incluir estudios de clima, meteorología y calidad del aire, ruido y vibraciones, campos electromagnéticos y radiación, luminosidad, recurso hídrico, fauna marina como peces,

mamíferos marinos, necton, bentos, entre otros; hábitats marinos, estudios de avifauna, flora y vegetación, ecosistemas marinos, patrimonio cultural subacuático, valor paisajístico y uso del territorio; así como estudios de navegación marina, estudios socioeconómicos, pesca comercial y evaluaciones de impacto en la aviación. Las principales actividades asociadas a esta fase se describen a continuación:

- a) **Estudios del lecho marino:** Las técnicas abarcan la recolección de muestras utilizando herramientas como cucharas y sacos, arrastrando redes epibentónicas y utilizando video submarino de descenso.
- b) **Estudios de peces y mariscos:** Se emplean diversos métodos de pesca, como las redes de arrastre o trasmallos que se deslizan por el fondo marino, así como las redes de enmalle en áreas donde no es posible el arrastre. También se pueden usar redes de plancton para estudiar huevos o larvas de peces. Por lo general, se llevan a cabo utilizando embarcaciones pesqueras locales, siempre y cuando cumplan con los estándares de seguridad, lo que facilita la interacción con la comunidad pesquera.
- c) **Estudios Ornitológicos:** Estos estudios abarcan aves marinas, aves acuáticas invernantes cercanas a la costa y aves terrestres migratorias, con el fin de entender cómo utilizan el área del proyecto y, por ende, los posibles impactos que un parque eólico podría tener, incluyendo colisiones con los aerogeneradores, molestias y desplazamientos, y la pérdida directa e indirecta de hábitat (por ejemplo, mediante la afectación de especies de peces que sirven de alimentación). Los métodos de observación aéreos y marítimos digitales son comunes para calcular la población en el área y recopilar datos sobre el comportamiento, incluyendo las alturas de vuelo de las aves (un factor clave para evaluar posibles colisiones). Además, se recurre a técnicas como el seguimiento por GPS, el uso de radar y estudios desde puntos de observación en la costa para abordar interrogantes específicas sobre el área.

En las zonas offshore los estudios visuales tradicionales no son adecuados para registrar aves marinas, ya que vuelan a altitudes relativamente bajas y pueden causar perturbaciones, y por lo tanto, los datos recopilados no son representativos de las condiciones de referencia (BVG Associates, 2019). En su lugar, se pueden utilizar aviones de estudios digital que vuelan a altitudes mucho más altas, registrando tanto aves como mamíferos marinos. Estos aviones cuentan con una variedad de instrumentos de teledetección a bordo, como cámaras digitales de alta resolución, lidar, imágenes de video e imágenes espectrométricas.

- d) **Estudios de Fauna Marina:** Se realizan estudios sobre mamíferos marinos para entender cómo interactúan con el área propuesta y, por consiguiente, los diversos impactos que un parque eólico podría tener, que incluyen perturbaciones y desplazamientos potenciales, así como lesiones físicas y auditivas durante el proceso de instalación de pilotes, y la pérdida directa e indirecta de hábitat. De acuerdo con BVG Associates (2019), los métodos tradicionales de observación visual desde embarcaciones y plataformas aéreas están siendo complementados o reemplazados por tecnologías más precisas, como el monitoreo acústico, la colocación de transmisores satelitales en individuos y el monitoreo de video controlado de manera remota. Se deben considerar las condiciones meteorológicas y del mar desfavorables en la

planificación de los estudios para garantizar que los datos recopilados sean aceptables.

Los estudios de avistamiento visual desde embarcaciones pueden complementarse con un hidrófono remolcado para llevar a cabo el monitoreo acústico pasivo de mamíferos marinos.

4.1.3. Estudios del recurso eólico y datos metoceanicos

Normalmente los proyectos eólicos offshore requieren datos de velocidad del viento al menos hasta la altura propuesta del centro de buje de los aerogeneradores; alturas que pueden ir entre los 150 y 250 metros sobre el nivel del mar y superiores. Las torres de medición de velocidad del viento en la altura del centro de buje podrían estar ancladas en el lecho marino y requieren una estructura submarina. Las bases de las torres de medición generalmente son monopilotes con piezas de transición similares a las fundaciones de turbinas, pero de construcción mucho más ligera, o en aguas más profundas, se pueden utilizar estructuras de tipo jackets, los métodos constructivos de ambos se describen más adelante.

Las torres suelen ser de construcción reticulada de acero inoxidable con una instalación para el ascenso del personal (incluido un sistema de prevención de caídas). El acceso del personal a la plataforma se aborda de la misma manera que para los aerogeneradores, además, suelen estar equipadas con anemómetros de copa o anemómetros sónicos. De acuerdo con la norma IEC 61400-12-1, también se tiene la posibilidad de utilizar las tecnologías LiDAR y SODAR que son dispositivos de anemometría que utilizan principios acústicos láseres para medir la velocidad y dirección del viento hasta a 300 metros sobre el nivel del mar. Dichos sistemas son factibles de ser instalados en boyas, pero las inversiones asociadas a este tipo de equipos son significativas.

Se instalan además sistemas de medición en la ubicación del proyecto para recopilar datos de viento (velocidad, dirección) y otros datos meteorológicos relevantes (temperatura, presión, humedad) y radares de aves e hidrófonos que detectan la actividad de cetáceos pueden proporcionar información adicional a las encuestas ambientales basadas en barcos y aviones.

Además, boyas metoceanográficas se instalan dentro y alrededor del sitio del parque eólico para recopilar datos metoceanográficos, incluidas las características de las olas y las mareas. Los lidars flotantes se instalan en boyas con cables de amarre.

Es importante mencionar que las torres de plataforma fija están volviéndose menos comunes ya que el lidar flotante ha alcanzado ahora un mayor nivel de aceptación en la industria. De acuerdo con BVG Associates (2019), varios desarrolladores de parques eólicos offshore han diseñado, financiado y construido proyectos basados únicamente en datos de lidar. El lidar de viento también se puede colocar en infraestructuras existentes (como plataformas de gas cercanas y faros) o, en algunos casos, en tierra o en islas cercanas, lo que evitaría la necesidad de incluir una torre o infraestructura para esto, disminuyendo los impactos ambientales.

Los sistemas de medición de viento y metoceanográficos requieren suministro de energía para operar sensores, almacenamiento de datos y telemetría. Para sistemas de baja potencia, esto se logra a menudo con paneles solares fotovoltaicos, pequeños

aerogeneradores y almacenamiento de baterías. Los sistemas más grandes utilizarán generadores diésel (BVG Associates, 2019, pág. 26).

Las actividades de mantenimiento se llevan a cabo de 2 a 4 veces al año. Los sistemas están diseñados para operar de forma autónoma, con sistemas integrados de energía, datos y comunicaciones a bordo.

4.1.4. Estudios geológicos e hidrológicos

Los estudios geológicos se dividen en estudios geofísicos y geotécnicos.

- a) **Estudios geofísicos:** Se basan en técnicas no invasivas como métodos sísmicos, ecografía y magnetometría. Estas técnicas permiten mapear la profundidad del agua y el lecho marino utilizando sondeos de eco convencionales, de haz único o multihaz, así como batimetría de escaneo amplio. Además, se emplea sonar de barrido lateral para cartografiar el fondo marino y detectar posibles objetos. Además, estas técnicas pueden ser empleadas para identificar posibles sitios arqueológicos submarinos.

Los buques geofísicos suelen tener una longitud de unos 30-70 metros. Se utilizan múltiples tripulaciones, que incluyen operadores de equipos altamente especializados. La tripulación trabaja en turnos de 12 horas, con rotaciones mensuales que permiten un flujo constante de observación, procesamiento e interpretación de datos.

- b) **Estudios geotécnicos:** se llevan a cabo mediante métodos intrusivos, como perforaciones con muestreo de suelo y roca, y pruebas de penetración con cono (CPT) que pueden llegar a profundidades de hasta 70 m. Estas investigaciones implican perforaciones para explorar las características físicas del lecho marino, mientras que las rutas de los cables se investigan con vibrocorers y CPTs superficiales (hasta 5 m). Las muestras obtenidas se analizan en laboratorios marinos para obtener parámetros básicos del suelo y realizar pruebas detalladas. Los datos geotécnicos se combinan con los resultados de la encuesta geofísica para mejorar el modelo geológico y determinar los riesgos y la viabilidad de las actividades de construcción.

Los barcos utilizados para estudios geotécnicos suelen tener entre 60 y 100 metros de longitud y están equipados con sistemas de perforación que operan a través de una abertura central llamada "moon pool". Además, pueden operar de forma independiente en ubicaciones remotas y deben ser capaces de posicionarse con precisión utilizando sistemas de posicionamiento dinámico o anclas.

Los estudios hidrológicos examinan el impacto del proyecto en la sedimentación local y los procesos costeros como la erosión. Este estudio suele formar parte del levantamiento geofísico. Estos estudios también son parte del monitoreo posterior a la construcción durante la fase operativa.

4.1.5. Ingeniería y consultoría

El estudio de ingeniería abarca una serie de aspectos cruciales para la optimización y diseño del parque eólico. Esto incluye la selección y diseño del layout del parque, la elección del aerogenerador, el tipo de fundación o cimentación, así como la estrategia eléctrica y de diseño. Además, gestiona las interfaces entre distintos componentes,

planifica medidas de salud y seguridad, define métodos de instalación y desarrolla estrategias operativas. Estos elementos se consideran con el objetivo de minimizar los costos y garantizar la eficiencia y seguridad del proyecto en todas sus etapas, desde la construcción hasta la operación. Una vez obtenidos todos los resultados de los estudios in situ sobre la caracterización del sitio, se continúa con la selección de la tecnología y método constructivo para esa área en específico.

Una distribución básica de operación de un parque eólico offshore se muestra en la Figura 8, donde se destacan los principales componentes de este:

- 1) Aerogeneradores
- 2) Fundaciones o Cimentaciones
- 3) Red de cables submarinos de baja tensión,
- 4) Subestación transformadora
- 5) Cable submarino de alta tensión
- 6) Subestación terrestre para conexión a la red eléctrica nacional.

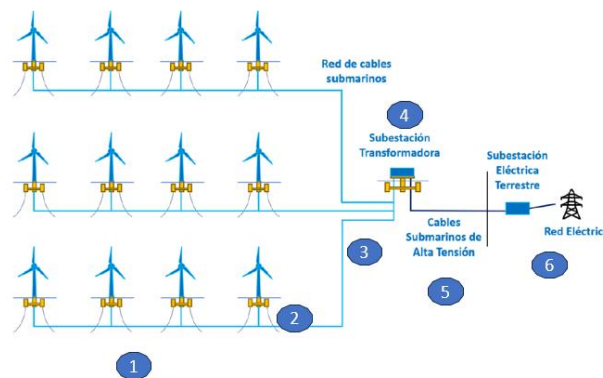


Figura 8. Distribución básica de operación de un parque eólico offshore Fuente: Elaboración propia; adaptación a partir de AEE (2021, pág. 14)

4.2. Aerogeneradores offshore

Los aerogeneradores producen electricidad utilizando la fuerza del viento para impulsar un generador eléctrico, tal como se explicó en la sección 3.6. El viento pasa alrededor de las palas, generando sustentación y realizando un par que hace girar el rotor. Las palas giratorias mueven un eje que pasa a través de una caja de engranajes, la cual aumenta la velocidad de rotación a la adecuada para el generador y el generador utiliza campos magnéticos para convertir la energía rotacional en energía eléctrica. La salida de energía se dirige a un transformador, que eleva la tensión de salida del generador al nivel de voltaje adecuado para el sistema de recolección de energía. Los modelos más grandes de aerogeneradores en funcionamiento para el año 2023, clasificados según su capacidad y fabricante, incluyen el Goldwind GWH252-16MW de 16 MW (con un diámetro de rotor de 250 m), el General Electric Haliade-X 14 MW de 14 MW y diámetro de rotor de 220 m (TGS New Energy, 2024).

A continuación, en la Tabla 6 se presenta una tabla con la recopilación de los principales modelos y fabricantes de aerogeneradores offshore instalados y en prototipo en el mundo para el año 2024:

Tabla 6. Principales fabricantes y modelos de aerogeneradores para el año 2024. Fuente: TGS (2024).

Fabricante	Modelo	Potencia (MW)	Diámetro de Rotor (m)	Status	Comentarios
Nordex	N90/2500	2,5	90	Discontinuas	
Dongfang Electric	DEW-G5000-140	5	140	Etapas comerciales	
Dongfang Electric	DEW-5.5MW-140	5,5	140	Etapas comerciales	
Siemens Gamesa	SWT-6.0-154	6	154	Etapas comerciales	
GE Renewable Energy	Haliade* 150-6	6	150	Etapas comerciales	
2-B Energy	2B6	6	140,6	Prototipo instalado	
Goldwind	GW168/6.45 MW	6,45	168	Etapas comerciales	
Siemens Gamesa	SWT-7.0-154	7	154	Etapas comerciales	
Dongfang Electric	DEW-D7000-186	7	186	Etapas comerciales	
Shanghai Electric Wind Power Group Co., Ltd.	SE 7.0	7	--		
Envision	EN-200/7MW	7	200	Etapas comerciales	
Ming Yang	MySE7.0-158	7	158	Etapas comerciales	
Dongfang Electric	DEW-7.5MW-186	7,5	186	Etapas comerciales	

Fabricante	Modelo	Potencia (MW)	Diámetro de Rotor (m)	Status	Comentarios
Goldwind	GW175-8.0MW / GW168-8.0MW	8	168/175	Etapas comercial	El nuevo aerogenerador cuenta con un modo de sobre marcha que permite operar a 8.5 MW.
Ming Yang	MySE 8.0-180	8	180	Etapas comercial	
Shanghai Electric Wind Power Group Co., Ltd.	W8000-167	8	167	Etapas comercial	
CSSC Haizhuang Wind Power	H220-8350	8	220	Etapas comercial	
Siemens Gamesa	SG 8.0-167 DD	8	167	Etapas comercial	
Vestas	V164-8.0 MW	8	164	Etapas comercial	
Envision	EN-226/8.5	8,5	226	Etapas comercial	
Goldwind	GWH 230-9.0MW	9	230	Etapas comercial	
Zhejiang Windey Co.	WD225-9000-OS	9	225	Etapas comercial	
Vestas	V174-9.5 MW	9,5	174	Etapas comercial	
Vestas	V164-9.5 MW	9,5	164	Etapas comercial	
Siemens Gamesa	SG 10.0-193 DD	10	193	Etapas comercial	

Fabricante	Modelo	Potencia (MW)	Diámetro de Rotor (m)	Status	Comentarios
Dongfang Electric	DEW-D10000-185	10	185	Etapla comercial	Se utilizaron tecnologías de transmisión directa de imán permanente y conversión de potencia total para lograr un rendimiento activo resistente a tifones.
Dongfang Electric	DEW-H10000-242	10	242	Etapla Comercial	
Zhejiang Windey Co.	9.X-10.X Haiyao Platform	10		Etapla comercial	
CSSC Haizhuang Wind Power	H 210-10MW	10	210	Etapla comercial	
Vestas	V164-10.0 MW	10	164	Etapla comercial	
Siemens Gamesa	SG 11.0-200 DD	11	200	Etapla comercial	
Ming Yang	MYSE11-230	11	230	Etapla comercial	Instalado en 2021
Dongfang Electric	DEW-11MW-185	11	185	Prototipo instalado	
Shanghai Electric Wind Power Group Co., Ltd.	SEW11.0-208	11	208	Etapla comercial	
Ming Yang	MySE12-242	12	242	Etapla comercial	Mingyang Smart Energy completó la instalación del primer aerogenerador marino MySE 12-242 en el parque

Fabricante	Modelo	Potencia (MW)	Diámetro de Rotor (m)	Status	Comentarios
					eólico marino Mingyang Qingzhou 4 de 500MW en junio de 2023. El aerogenerador offshore MySE12MW (MySE12-242) ha sido diseñada a medida para áreas marinas propensas a tifones como Guangdong y Fujian
GE Renewable Energy	Haliade-X 12 MW	12	220	Etapas comerciales	El primer prototipo fue instalado para pruebas en Carnet, Francia. La instalación se completó el 20/11/2013. En enero de 2015, el aerogenerador recibió su certificación final de tipo de DNV GL. Esta certificación indica que el aerogenerador ha sido evaluado y se ha determinado que cumple con los estándares y requisitos específicos para su tipo de aplicación.
GE Renewable Energy	Haliade-X 13 MW	13	220	Etapas comerciales	

Fabricante	Modelo	Potencia (MW)	Diámetro de Rotor (m)	Status	Comentarios
Dongfang Electric	DEW-D13000-245	13	245	Etapas Comercial	
Vestas	V236-13.6 MW	13,6	236	Prototipo instalado	
Goldwind	GWH252-13.6MW	13,6	252	Etapas comercial	El aerogenerador se instaló en octubre del 2022 en Vietnam en las aguas de la provincia de Soc Trang
Siemens Gamesa	SG 14-236 DD	14	236	Etapas comercial	
Envision	EN-252/14	14	252	Etapas comercial	
Siemens Gamesa	SG 14-222 DD	14	222	Etapas comercial	
GE Renewable Energy	Haliade-X 14 MW	14	220	Etapas comercial	El Haliade-X 14 MW es una versión mejorada de las unidades de 12 MW y 13 MW.
Goldwind	GWH252-14.3MW	14,3	252	Etapas comercial	
Vestas	V236-15.0 MW	15	236	Prototipo instalado	Prototipo instalado en diciembre de 2022 en el centro de pruebas de Østerild, Dinamarca. Producción en serie de palas V236-15.0MW durante la segunda mitad de 2023 en

Fabricante	Modelo	Potencia (MW)	Diámetro de Rotor (m)	Status	Comentarios
					Taranto, Italia y Nakskov, Dinamarca. Las góndolas se producirán en Szczecin, Polonia y en el puerto de Lindø en Odense, Dinamarca.
Goldwind	GWH252-16MW	16	252	Etapla comercial	Se instaló con éxito en junio del 2023 en el parque eólico marino Three Gorges en Pingtan, provincia de Fujian, China.
Ming Yang	MySE 16.0-242	16	242	Prototipo en desarrollo	Se espera que entre en etapa comercial a mediados del 2024.
Ming Yang	MySE 16-260	16	260	Concepto	
GE Renewable Energy	Haliade-X-18MW	18		Concepto	Se espera su instalación para finales de finales de la década de 2020.
Seawind	Seawind 18	18		Concepto	Prototipo esperado para el 2024
CSSC Haizhuang Wind Power	H260-18.0MW	18	260	Prototipo instalado	

Fabricante	Modelo	Potencia (MW)	Diámetro de Rotor (m)	Status	Comentarios
Sterling	Sterling Accelerator Turbine	20		Concepto	
Ming Yang	MySE 22MW	22	310	Prototipo en desarrollo	Se espera que esté en desarrollo entre 2024 y 2025
Zhejiang Windey Co.	16X-18X Haiying	16-18		Prototipo en desarrollo	
Ming Yang	MySE 18.X-20MW	18-20	260 - 290	Prototipo en desarrollo	
Nordex	N149/4.0-4.5	4 - 4,5	149	Discontinuadas	

Actualmente, los aerogeneradores pueden alcanzar una capacidad de 16 MW, habiendo ya modelos en prototipo que pasan los 20 MW de potencia unitaria.

4.3. Fundaciones o Cimentaciones

La tecnología de funcionamiento de un aerogenerador eólico offshore es básicamente igual a uno onshore; sin embargo, uno de los elementos más importantes y diferenciales entre ambas opciones, es el tipo de fundaciones. Cuando un aerogenerador está en tierra, la fundación es una losa de concreto con la capacidad de crear un momento y una fuerza de sujeción suficientes para resistir los movimientos y momentos de flexión del viento que actúan sobre los aerogeneradores. De acuerdo con (Thomsen, 2012, pág. 3), cuando un aerogenerador está en alta mar, el resultado es el mismo, pero hay cuatro factores adicionales a considerar al diseñar la fundación como profundidad del agua, carga de las olas, condiciones del lecho marino y las cargas dinámicas.

Existen dos tipos principales de fundaciones: fijas y flotantes. Las bases fijas son adecuadas para aguas poco profundas e incluyen monopilotes, fundaciones por gravedad, cubetas de succión, trípodes y estructuras tipo jackets, entre otros (Fan et al., 2022, pág. 11). La mayoría de los aerogeneradores marinos existentes utilizan bases fijas, especialmente monopilotes.

A medida que la profundidad del agua aumenta, el costo de las bases fijas se incrementa considerablemente, por lo que las bases flotantes se convierten en una opción más adecuada para aguas profundas.

A continuación, en la Tabla 7 se presentan las principales características de cada tipo de fundación fija y en la Figura 9 se muestran sus principales configuraciones.

Tabla 7. Principales características de cada tipo de fundación o cimentación de estructura fija. Fuente: Elaboración Propia

Tipo	Profundidad	Características
Monopilote	0-25 m	El monopilote es un tipo de fundación que consiste en un tubo de acero de gran diámetro que se introduce verticalmente en el lecho marino mediante un martillo hidráulico. Se ancla en el lecho marino a través de la fricción entre el tubo y el suelo circundante. Proporciona estabilidad y resistencia para soportar las cargas dinámicas y los momentos de flexión generados por el viento y las olas. El diámetro del monopilote puede variar entre 4 y 8 metros, dependiendo de los requerimientos del proyecto. Este tipo de fundación es adecuado para condiciones de lecho marino duro a semiduro. La falta de presión vertical del suelo sobre el monopilote permite que se mantenga en posición vertical mediante la fricción lateral con el lecho marino. Es una opción popular en la industria eólica marina debido a su eficiencia, durabilidad y capacidad para soportar las condiciones ambientales adversas en alta mar.

Tipo	Profundidad	Características
Base de Gravedad	0 – 30 m	La base de gravedad es otro tipo de fundación, a diferencia del monopilote, que se ancla en el lecho marino a través de la fricción, la base de gravedad utiliza su propio peso para mantenerse en su lugar. Consiste en una estructura masiva de hormigón que se construye en tierra o en una plataforma flotante y luego se transporta e instala en el lugar designado en el lecho marino. La forma de la base puede variar, pero suele ser rectangular o circular para proporcionar estabilidad y resistencia al viento y las olas, puede llegar a tener entre 15-25 metros de diámetro. Una vez instalada en el lecho marino, la base se llena con agua o arena para aumentar su peso y asegurar su estabilidad, su peso puede llegar a ser entre 1.500 a 4.500 toneladas. La gravedad y el peso adicional permiten que la base se mantenga en su lugar y soporte las cargas y momentos generados por el aerogenerador. Es una opción adecuada para aguas profundas donde la instalación de un monopilote puede ser más compleja o costosa. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la construcción y el transporte de la base de gravedad pueden requerir una logística y una planificación cuidadosas debido a su gran tamaño y peso.
Trípode	20 – 80 m	Como su nombre lo indica, tiene una estructura similar a un trípode con tres pilares principales que se extienden desde el fondo marino hasta la superficie del agua. Cada pilar del trípode está compuesto por una serie de pilotes de acero o concreto que se insertan en el lecho marino. Estos pilotes proporcionan estabilidad y resistencia al trípode, asegurando que pueda soportar las cargas dinámicas generadas por el viento y las olas. La parte superior del trípode se conecta a la torre del aerogenerador, proporcionando una base sólida y estable. El diseño en forma de trípode permite distribuir las cargas de manera uniforme entre los pilares, lo que mejora la capacidad de resistencia y estabilidad del conjunto. El trípode es especialmente adecuado para terrenos marinos más blandos o menos estables, ya que los pilotes pueden penetrar en el suelo y proporcionar un anclaje seguro. Además, la estructura abierta del trípode permite una mejor circulación del agua y la reducción de la carga de las corrientes marinas. Este tipo de fundación puede soportar una profundidad de agua considerable y se utiliza comúnmente en proyectos de aguas profundas. La desventaja del trípode es que, para un aerogenerador marino de tamaño razonable, es muy costoso de producir, difícil de manejar en grandes cantidades al mismo tiempo y tarda mucho más tiempo en instalarse que un monopilote "regular".
Jackets	10 – 80 m	Consiste en una estructura de acero en forma de armazón, similar a una chaqueta, que se coloca sobre el lecho marino. Consta de pilotes verticales o patas que se anclan al fondo

Tipo	Profundidad	Características
		marino y se conectan a través de barras horizontales. Esta estructura forma una especie de armazón tridimensional que proporciona una base sólida y estable para la torre y la góndola del aerogenerador. Es adecuada para terrenos marinos más blandos o con suelos menos estables. Los pilotes anclados en el lecho marino y la estructura en forma de armazón brindan una resistencia y estabilidad adicionales para soportar las cargas dinámicas generadas por el viento y las olas. La ventaja es su capacidad para soportar cargas tanto verticales como horizontales. Los pilotes y la estructura de acero pueden resistir fuerzas de flexión y momentos generados por el aerogenerador y las condiciones marinas. Sin embargo, la fundación tipo jackets puede ser más costosa y compleja de producir e instalar en comparación con otros tipos de fundación, como el monopilote. Se requiere un diseño y construcción cuidadosos, así como equipos especializados para su instalación. Esta fundación se utiliza exclusivamente para aguas de gran profundidad, donde es la solución preferida. Al igual que el trípode, está equipada con mangas para pilotes en las esquinas, donde se insertan los pilotes de anclaje para mantener la jackets en su lugar.
Cubeta de succión	5 -60 m	Consiste en un cubo o caja de acero que se coloca sobre el lecho marino y se "hunde" mediante la creación de un vacío o succión en su interior. El proceso de instalación comienza excavando un agujero en el lecho marino y luego colocando la cubeta en posición vertical dentro de él. Luego, se bombea agua desde el interior de la cubeta, lo que crea un vacío que succiona la fundación hacia abajo y la ancla al suelo marino. La presión negativa creada por el vacío asegura que la fundación quede firmemente anclada y estabilizada en su lugar. Esta fundación tiene varias ventajas. En primer lugar, ofrece una instalación rápida y eficiente, ya que no requiere pilotes ni equipos de perforación. Además, es fácil de desinstalar y reubicar si es necesario.

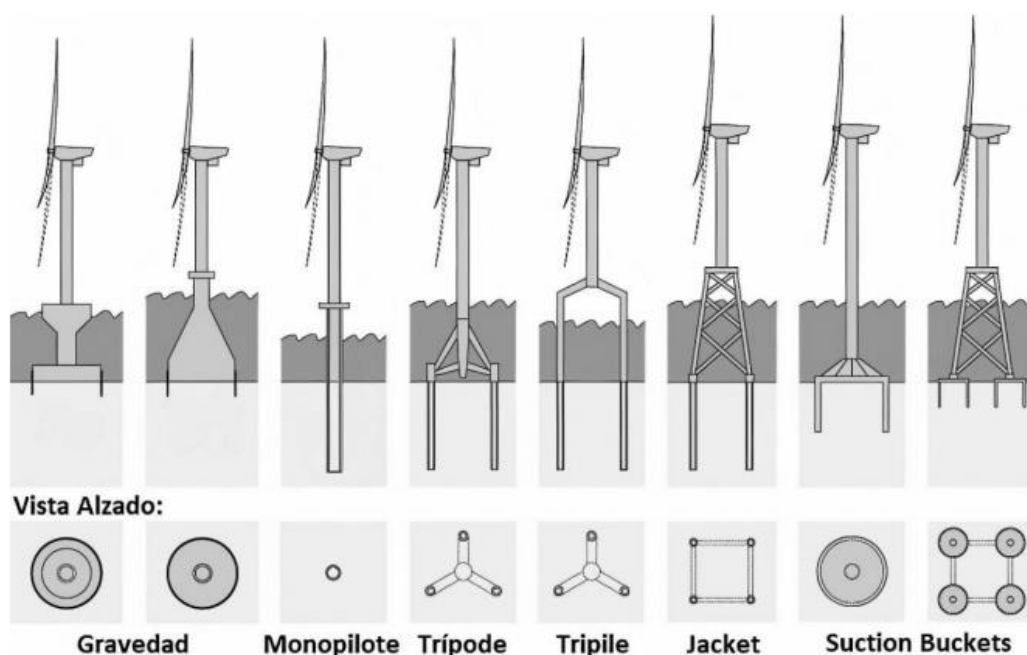


Figura 9. Tecnologías de Fundaciones fijas Fuente: AEE (2021, pág. 5)

Por otro lado, la tecnología de energía eólica flotante también se está implementando en parques comerciales. Normalmente el aerogenerador y la estructura están anclados al lecho marino mediante catenarias o tensores y es apta para fondos marinos donde no es viable la instalación de tecnología de cimentación fija.

De acuerdo con AEE (2021, pág. 10), actualmente existen numerosos conceptos de energía eólica flotante en desarrollo en diferentes regiones, siendo Europa, EE. UU. y Japón los líderes en innovación en este campo. Estas tecnologías se pueden clasificar en diferentes categorías según el diseño de la estructura flotante, el sistema de amarre y el nivel de madurez tecnológica.

A continuación, en la Tabla 8 se presentan las principales características de cada tipo de fundación fija y en la Figura 10 se muestran sus principales configuraciones.

Tabla 8. Principales características de cada tipo de fundación o cimentación de estructura flotante. Fuente: Elaboración Propia

Tipo	Característica
Spar	La estructura flotante está compuesta por un cilindro con contrapeso que mantiene el centro de gravedad del aerogenerador por debajo del centro de flotación, lo que garantiza su estabilidad. Para mantener el aerogenerador en su posición, se utiliza un cable o tirante que lo ancla al lecho marino. Las catenarias ofrecen la ventaja de ser una opción de bajo costo y fácil utilización en aguas poco profundas. Esta plataforma presenta una solución de diseño simple y estable.
Semi-sumergible	Se refiere a una configuración que incluye varias columnas de dimensiones amplias, las cuales están conectadas entre sí para proporcionar estabilidad hidrostática. Estas plataformas logran una estabilidad estática distribuyendo la flotación en una

Tipo	Característica
	superficie más amplia. Para mantener la estructura en su posición, se utilizan una o más catenarias o tirantes que la anclan al lecho marino.
TLP (Tension-Leg Platform)	Están compuestas por una columna central y brazos conectados a tensores que aseguran la cimentación a los anclajes. La estabilidad estática de estas estructuras se logra mediante la tensión proporcionada por un sistema de tensión vertical (líneas de anclaje). Este sistema ofrece ventajas sobre las líneas de catenarias a medida que se adentra en aguas más profundas, ya que requiere una huella más pequeña y menos líneas para alcanzar la tensión necesaria, lo que reduce los costes de instalación. Si la orientación de las líneas de tensión es completamente vertical, la huella es mínima, pero se deben utilizar anclajes más complejos y costosos para soportar mayores tensiones verticales.
Barge	Este tipo de tecnología utiliza una estructura flotante de gran tamaño para lograr estabilidad a través de la distribución de la flotabilidad.
Fundaciones multiplataforma	Estas fundaciones combinan varias de las tecnologías mencionadas anteriormente.



Figura 10. Tecnologías de fundaciones flotantes. Fuente: AEE (2021, pág. 6)

En Uruguay, la Zona Económica Exclusiva que se está evaluando por parte de ANCAP para la instalación de proyectos eólicos offshore, cuenta con profundidades que van desde los 20 a los 60 metros de profundidad, como se detallará en la sección 9. En base a las condiciones detectadas de tipo de suelo, oleajes y profundidades, se podrá seleccionar el aerogenerador que mejor se adapte al sitio.

Entre las condiciones generales del layout y distribución de un parque eólico offshore se debe tener en cuenta que los aerogeneradores deberán ser ubicados de manera que se maximice la cantidad de energía a producir. Los aerogeneradores no pueden estar

muy cerca, para evitar pérdidas de velocidad de viento entre ellos por factores de estela, que es la creación de vientos turbulentos y más lentos detrás del aerogenerador, como se puede ver en la Figura 11, en contraste con el viento que llega directamente al aerogenerador. A partir de este fenómeno, se puede inferir que cuanto más alejados estén los aerogeneradores entre sí, mayor será su eficiencia. Sin embargo, tampoco pueden estar demasiado separados entre sí, ya que la inversión en el cableado interno para interconectar los aerogeneradores entre sí aumentará considerablemente, además de requerir mayores áreas de instalación, lo cual se intenta evitar.

La interferencia entre aerogeneradores por el fenómeno de estela en parque eólicos offshore, presenta grandes desafíos a los efectos de la micro localización, ya que el menor nivel de turbulencia esperable en dichos sitios, implican menor disipación de las estelas y potencial mayor afectación.



Figura 11. Efecto estela que se produce detrás de los aerogeneradores. Fuente: Google Imágenes.

Por lo general, de acuerdo con Letcher (2017, pág. 240), la separación entre los aerogeneradores equivale a 3 a 10 veces el diámetro del rotor y depende de la dirección predominante del viento. La separación debe ser mayor a 3 a 4 diámetros de rotor perpendicular a la dirección predominante del viento y de 6 a 10 diámetros para la dirección paralela a la dirección del viento, tal como se muestra en la Figura 12.

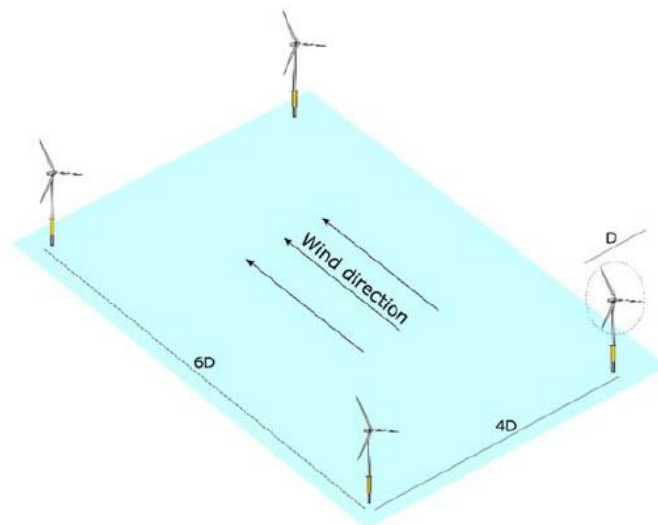


Figura 12. Espaciado mínimo entre aerogeneradores. Fuente: Letcher (2017)

La distancia presentada por Letcher (2017, pág. 240), está en línea con lo descrito por Rincón (2020, pág. 17), que menciona también que para la separación entre aerogeneradores de una misma fila se suele adoptar una distancia 4 veces el diámetro del aerogenerador, y para la separación entre filas, una distancia 7 veces el diámetro del rotor. Además, destaca que para la disposición de las columnas y de las filas generalmente se utiliza una disposición lineal al tresbolillo por filas, y esto mejora el rendimiento, tal como se puede ver en la Figura 12.

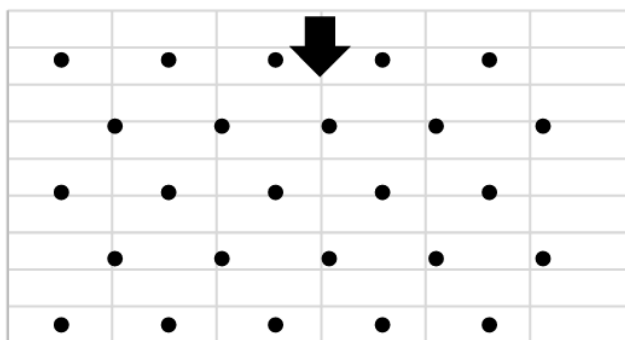


Figura 13. Representación gráfica de una distribución de aerogeneradores al tresbolillo. Fuente: Rincón (2020).

Como se puede ver, el espaciado adecuado entre aerogeneradores dentro de un parque eólico es esencial para maximizar su rendimiento y eficiencia. Tener en cuenta la dirección predominante del viento y aplicar las recomendaciones de separación adecuadas, como indican Letcher y Rincón, permite optimizar la captura de energía eólica y mejorar el funcionamiento general del parque. La necesidad de evitar el efecto estela entre los aerogeneradores, conlleva a que proyectos offshore de tamaños pequeños o medianos ocupen un área de dimensiones considerables, que en el entorno marino no llega a ser una limitación, pero en cuanto a su afectación puede tener impactos considerables.

Por lo general, esta necesidad de espacio conlleva variaciones significativas en las condiciones geológicas y subsuperficiales, así como limitaciones prácticas. Entre los factores a considerar se encuentran cambios bruscos en el lecho marino que afectan la profundidad del agua, alteraciones en la estratificación del suelo, pendientes submarinas y la existencia de objetos extraños como naufragios. Además, se debe tener en cuenta la ubicación de infraestructuras como gasoductos y cables de fibra óptica.

4.4. Red de cableado submarino de media tensión

El sistema de cables submarinos de media tensión se utiliza para transportar la energía generada por los aerogeneradores marinos hacia la costa o hacia una subestación en alta mar (Rodríguez, 2020, pág. 5). Los cables utilizados deberían estar diseñados para soportar las condiciones adversas del entorno marino, como la exposición a la salinidad, las corrientes marinas y las fuerzas del oleaje. Debido a esto, los conductores requieren una protección especial en comparación con otros conductores de media tensión.

Normalmente los conductores deben estar compuestos por un núcleo de cobre recubierto con capas conductoras para controlar los campos magnéticos, así como un aislamiento de alto voltaje hecho generalmente de polietileno reticulado. El cable exterior está protegido con acero galvanizado para evitar daños causados por factores externos.

Además, Rodríguez (2020, pág. 21) menciona que, para permitir la transmisión de señales de medición y control, el cable submarino también incluye un cable de fibra óptica. Este cable de fibra óptica tiene un núcleo rodeado de hilos de acero galvanizado que protegen el cable contra posibles daños mecánicos.

La configuración de conexión que se utilice para cada proyecto dependerá del diseño definitivo que se seleccione; sin embargo, Rodríguez (2020, pág. 22) menciona que en conexiones de media tensión los aerogeneradores se conectan en forma de anillo y los cables transportan la energía eléctrica a la subestación de transformación.

La principal característica de esta conexión es que a medida que se van interconectando los aerogeneradores en paralelo, la corriente en cada tramo del circuito aumentará. Por lo tanto, a medida que se agreguen más aerogeneradores al circuito, la sección del cable deberá incrementarse siguiendo los criterios de selección de sección correspondientes. Además, los conductores deberán estar enterrados en el lecho marino hasta la conexión con el siguiente aerogenerador y hasta la subestación, como se observa en la Figura 14.

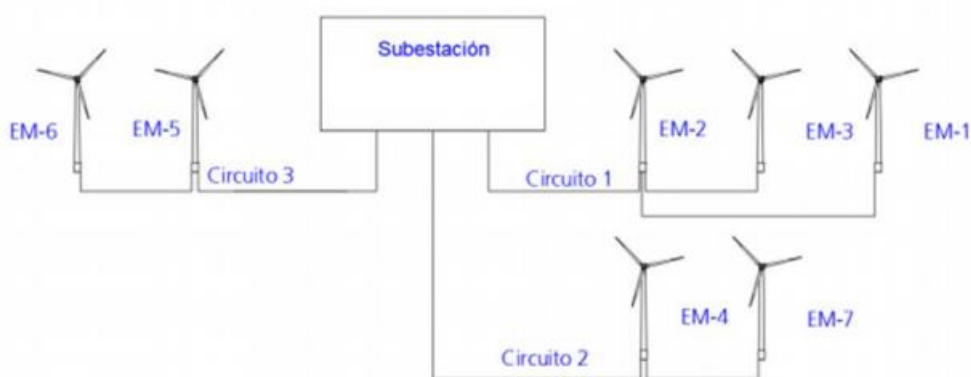


Figura 14. Conexión en media tensión de los distintos strings de aerogeneradores hasta la subestación elevadora
Fuente: Rodríguez (2020, pág. 22)

La potencia transmitida, la tensión, la distancia y las condiciones externas del área de trabajo de los cables seleccionados son los aspectos más relevantes para tener en cuenta en el momento de la elección, de acuerdo con Armstrong (2018, pág. 16). También se debe tener en cuenta el tipo de estructura del cable y si se requiere enterramiento.

En cuanto a la diferencia entre los cables CC y CA, existen diferencias básicas en su funcionamiento. Los cables CC son cables con un solo conductor para la transmisión de corriente, con un retorno a través de otro conductor o vía marina mediante un ánodo y un cátodo.

Por otro lado, los cables CA utilizan cables de tres núcleos, es decir, tres conductores, para transmitir la corriente y la información de funcionamiento de la estación offshore.

4.5. Subestación Transformadora

La función principal de las subestaciones transformadoras que se ubican en alta mar es la recolección y transformación de energía generada por los aerogeneradores, transformando la corriente eléctrica de media tensión a una corriente de alta tensión más adecuada para su transporte eficiente a tierra, además ayudan a estabilizar y regular la energía. Esto implica controlar la frecuencia y la tensión de la energía eléctrica para asegurar su calidad y compatibilidad con la red eléctrica.

Las subestaciones transformadoras offshore se conectan a la red eléctrica en tierra a través de cables submarinos de alta tensión. Estos cables transportan la energía generada en el parque eólico hacia la red de distribución eléctrica en tierra. En los proyectos eólicos offshore que se están diseñando para la producción de hidrógeno verde, se presentan distintas configuraciones, desde la transformación *in situ* en alta mar, como también la opción de transformación en tierra. Más adelante, en la sección 5.4 se explicarán las posibles opciones de configuración que existen para el hidrógeno verde.

Los edificios utilizados para alojar a la subestación transformadora pueden llegar a ser de gran complejidad constructiva (Rodríguez, 2020, pág. 22), ya que alberga transformadores que permiten elevar la tensión de media a alta, así como todo el equipo y material necesario para la protección de alta tensión. En la Figura 15 se muestra una imagen de ejemplo de una estación transformadora offshore.



Figura 15. Imagen referencia de subestación elevadora en alta mar, parque eólico Barrow Windpark. Fuente: Rodríguez (2020).

4.6. Cables submarinos de alta tensión

La función principal de los cables submarinos de alta tensión es la transmisión de energía eléctrica en grandes cantidades, desde fuentes de generación o desde la subestación transformadora hasta tierra firme; este tipo de transporte se puede realizar en CC o CA.

De acuerdo con Rodríguez (2020, pág. 25), el método de instalación de estos cables es conectar el extremo del cable a la subestación en la costa y luego, mediante el uso de flotadores en el cable para mantenerlo en la superficie del agua y así evitar posibles daños, se conecta en la subestación de transformación en alta mar. Una vez realizado esto, se van quitando los flotadores gradualmente hasta llegar al fondo. Dependiendo del lecho marino hay distintos métodos y herramientas para la colocación de los cables, Los cables van enterrados en el lecho marino para tratar de evitar conflictos con barcos y con la fauna marina.

El transporte de la electricidad se realiza en alta tensión para minimizar las pérdidas por efecto Joule. Los valores típicos de este transporte son de 132 kV a 220 kV usando el transporte CA y 150 kV a 320 kV usando el transporte CC, tal como lo menciona Rodríguez (2020, pág. 25).

A continuación, en la Tabla 9 se explican las principales características de las conexiones CC y AC:

Tabla 9. Principales características de las conexiones CC y AC

	Cableado en Corriente Continua (CC)	Cableado en Corriente Alterna (AC)
Descripción	De acuerdo con Rodríguez (2020), este sistema de transporte de electricidad se emplea especialmente en largas distancias, lo que lo convierte en un tema de interés fundamental en el análisis de los proyectos, dado que numerosos parques eólicos offshore se encuentran a una considerable distancia de la costa. Además, las pérdidas de energía disipada en forma de calor en este tipo de sistema son significativamente menores que en las líneas de transporte CA convencionales. En el proceso de transportar la energía eléctrica en CC, la corriente alterna generada en los aerogeneradores se convierte en corriente continua en una estación especializada. En el extremo opuesto de la línea, la corriente continua se transforma nuevamente en corriente alterna que puede ser utilizada en aplicaciones convencionales.	Esta modalidad de transporte de electricidad es generalmente preferida para el desplazamiento de energía eléctrica. Por lo general, estos métodos de transporte se implementan en sistemas trifásicos de corriente alterna. La electricidad es convertida a niveles elevados de tensión debido a que, al conocer el valor específico de la potencia a transmitir y aumentar la tensión correspondiente, permite lograr simultáneamente una disminución en la intensidad de corriente que circulará. Este enfoque conlleva a una reducción en las pérdidas debidas al efecto Joule. En una red de transmisión convencional, se emplean valores típicos alrededor de 220 kV y niveles superiores.
Características	La transmisión se lleva a cabo a través de un solo conductor principal, lo que significa que la corriente fluye en una dirección constante. Sin embargo, para que la corriente regrese y complete el circuito, se utiliza un	La corriente eléctrica se transmite utilizando lo que se conoce como cables de tres núcleos. Estos cables constan de tres conductores separados que funcionan en conjunto para transmitir tanto la corriente

	Cableado en Corriente Continua (CC)	Cableado en Corriente Alterna (AC)
	conductor secundario o una vía marina que emplea un proceso llamado ánodo/cátodo. Esta configuración permite que la electricidad fluya desde la subestación hasta la estación de destino y regrese a través de la vía marina, creando un circuito completo.	eléctrica como la información de funcionamiento de la estación offshore. La ventaja de esta estructura de tres núcleos es que permite la transmisión de corriente alterna, que cambia de dirección periódicamente, y al mismo tiempo, posibilita la comunicación de datos importantes relacionados con el funcionamiento de la estación.
Material	Los cables utilizados en instalaciones submarinas, ya sea tanto para la transmisión en media y alta tensión, deben estar diseñados con materiales específicos para resistir las condiciones submarinas y garantizar la transmisión segura y eficiente de la energía. Estos cables suelen estar compuestos por varias capas. De acuerdo con Armstrong (2018) las principales características y materiales de estos tipos de cables pueden ser: 1- Conductores: Los conductores dentro de los cables pueden estar hechos de cobre o aluminio. El cobre es un conductor eficiente, pero el aluminio puede ser más liviano y económico. 2- Aislamiento: La estructura que rodea al cable ha de tener una variedad de diferentes capas de aislamiento que garanticen impermeabilidad, flexibilidad y blindaje eléctrico. Los materiales de aislamiento comunes incluyen: • Cables con relleno de fluido: SCFF / SCOF (Self-contained fluid-filled / Self-contained oil-filled), es decir, cables autónomos rellenos de fluido o aceite; HPFF / HPOF (High-pressure fluid-filled / High-pressure oil-filled), que se refiere a cables llenos de fluido a alta presión o aceite a alta presión; HPGF (High-pressure gas-filled), cables con relleno de gas a alta presión y GC (Gas compression), cables sometidos a compresión gaseosa. Estos cables son empleados en aplicaciones con tensiones elevadas, alrededor de 500 kV, tienen diámetros que oscilan entre 110 y 160 mm, con un peso de 40 a 80 kg por metro. La circulación del aceite o fluido se logra mediante estaciones de bombeo ubicadas en ambos extremos de la línea. Para mantener una presión de bombeo constante, se implementa en tramos cortos de hasta 50 km. Un inconveniente significativo es la posibilidad de pérdida de aceite en algún punto del cableado. • Cables aislados con papel: MI (Mass-impregnated), cables impregnados en masa con papel; PILC (Paper-insulated lead-covered), cables con aislamiento de papel cubierto de plomo; PPL (Paper polypropylene laminate), cables con laminado de polipropileno y aislamiento de papel. En los cables tipo MI el aislamiento está compuesto por resina o aceite de alta densidad, lo que elimina la necesidad de tener un flujo constante de aceite o fluido en su interior. Esta característica evita, al mismo tiempo, el inconveniente de posibles fugas de fluido a lo largo del cableado.	

	Cableado en Corriente Continua (CC)	Cableado en Corriente Alterna (AC)
	• Cables extruidos: EPR (Ethylene propylene rubber), cables hechos de caucho de etileno propileno; PE (Polyethylene), cables con aislamiento de polietileno; XLPE (Cross-linked polyethylene), polietileno reticulado, que es recomendado especialmente para aplicaciones de alta temperatura. Son usados principalmente para tensiones de 300 kV. Estos cables, tienen ventajas como peso ligero (20-30 kg). Aunque pueden generar tensiones localizadas y deterioro del aislamiento, ofrecen costos menores y mayor longitud de transmisión en comparación con aislantes de relleno de fluido. 3- Relleno y capas protectoras: Se utilizan materiales de relleno para dar forma al cable y proteger los componentes internos. Además, se agregan capas de protección, como materiales poliméricos reforzados con fibras (FRP), para mejorar la resistencia mecánica y proteger contra daños durante la instalación y operación. 4- Cubierta exterior: La cubierta exterior protege el cable de los elementos marinos, la abrasión y otros factores ambientales. Las cubiertas suelen estar hechas de materiales termoplásticos resistentes a la intemperie. 5- Armazón de acero: Algunos cables submarinos también pueden incluir un armazón de acero para proporcionar resistencia adicional y ayudar a soportar la tensión en el cable.	
Ventajas	1- Eficiencia destacada en largas distancias (600 - 1000 km) en comparación con sistemas AC. 2- Mayor capacidad de transporte de energía eléctrica a igual tensión que los sistemas AC. 3- Posibilidad de interconectar sistemas de generación eléctrica con diferentes frecuencias. 4- Mantenimiento estable del flujo de potencia, independiente de oscilaciones en la red. 5- Menor impacto ambiental al requerir menos espacio y cable para la transmisión. 6- Pérdidas más bajas, incluidas las de los convertidores, en comparación con sistemas AC.	1- Tecnología madura y desarrollada con un historial probado de uso a lo largo del tiempo. 2- Mayor economía en comparación con el transporte en CC debido a la ausencia de la necesidad de costosos convertidores de tensión. 3- Robustez en el sistema al contar con menos componentes propensos a fallos, lo que contribuye a una mayor durabilidad y menor probabilidad de errores.
Desventajas	1- Mayor costo en distancias cortas debido a la necesidad de grandes convertidores.	1- Limitaciones térmicas en la transmisión de líneas, lo que puede afectar la capacidad de carga y eficiencia.

	Cableado en Corriente Continua (CC)	Cableado en Corriente Alterna (AC)
	2- Generación de armónicos de corriente y tensión en subestaciones CC. 3- Requerimiento de unidades de filtro-compensación y compensación de potencia reactiva debido al proceso de conversión y consumo de potencia reactiva.	2- Restricciones en términos de tensión, estabilidad y operación del sistema, lo que puede limitar la flexibilidad en la transmisión. 3- Capacidad de entrega de energía eléctrica a largas distancias inferior en comparación con la transmisión en CC. 4- Consumo de energía reactiva, lo que puede disminuir la eficiencia general y requerir medidas de compensación. 5- Mayor impacto ambiental debido a la necesidad de más espacio y cables en comparación con el transporte en CC.

El principal método de instalación del cableado submarino es mediante el uso de buques cableros. De acuerdo con Armstrong (2018, pág. 57), estas embarcaciones están diseñadas para llevar a cabo la instalación, incorporando rampas y poleas en la parte delantera y trasera para el manejo y colocación del cable. Durante la instalación, se debe tener en cuenta el tipo de lecho marino; si este consta de arena fina y carece de grandes depósitos de sedimentos o lechos rocosos, se puede proceder depositando gradualmente el cable en el lecho marino. En este proceso, el propio cable se hundirá naturalmente con el tiempo. Durante esta operación, la asistencia de buzos puede ser utilizada para verificar la adecuada colocación y funcionamiento del cable, así como para proporcionar orientación.

En situaciones más comunes, los lechos marinos tienden a ser menos uniformes, y pueden incluir áreas con suelos más duros y rocosos, siendo este el caso de la ZEE de Uruguay, ya que de acuerdo con ANCAP (2016, pág. 560), *“La zona de estudio presenta un carácter geomorfológico extremadamente dinámico y heterogéneo en toda su extensión, debido al origen pasivo del margen continental del Atlántico sudoccidental”*. En tales casos, se recurre a la utilización de vehículos operados a distancia (ROV) para llevar a cabo el proceso. Estos vehículos se encargan de dirigir el cable y crear una zanja utilizando un chorro de agua para alojar el cable, como se observa en la Figura 16. A medida que avanzan, se vuelven a cubrir los cables con los sedimentos que han sido removidos de la zanja.

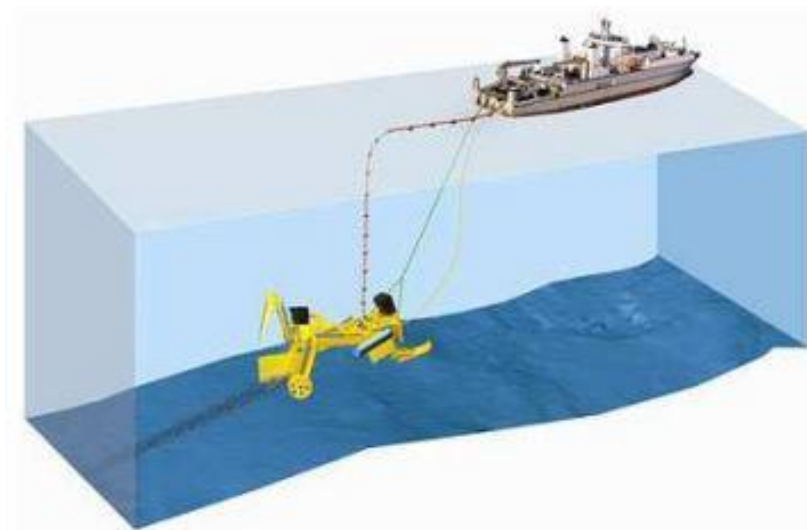


Figura 16. Tendido del cable mediante ROVs. Fuente: Armstrong (2018, pág. 60)

Las profundidades de entierro generalmente oscilan alrededor de 1 metro, pero en situaciones excepcionales, pueden llegar a alcanzar hasta 10 metros como medida de protección adicional.

4.7. Obras complementarias al proyecto

Entre los principales desafíos a los que se enfrentan los proyectos eólicos offshore están los espacios e infraestructura necesaria para ser utilizada como base logística. De acuerdo con Thomsen (2012, pág. 153), se debe considerar que toda la base logística de los proyectos se trabajará en tierra y es necesario acondicionar un puerto de preparación, para preparar y cargar los componentes hasta la ubicación del proyecto.

Se debe tomar en cuenta que los componentes que se instalan presentan un gran volumen y peso considerable, además en la mayoría de los casos requieren de un manejo delicado. Esta situación plantea un desafío significativo en cuanto a la configuración del sitio. También se debe evaluar el transporte en vehículos desde la zona de llegada del material hasta el área de almacenamiento, desde allí a la ubicación de reensamblaje, que suele estar ubicada en el muelle donde se cargan, y finalmente desde el área de reensamblaje hasta la embarcación de instalación, que los transportará al sitio del proyecto.

De acuerdo con Thomsen (2012, pág. 64), en la industria es común considerar un área de puerto de preparación de alrededor de 60,000 a 70,000 m²; sin embargo, esta área dependerá del tamaño total del proyecto y las necesidades de almacenamiento que pueda tener. A modo de indicación comparativa, se indica que el Puerto de Montevideo tiene aproximadamente 1.000.000 m² de superficie (ANP, 2023); sin embargo, está ocupado en su totalidad por las actividades locales, por lo cual se debe evaluar este aspecto entre los prioritarios. Además, se debe tomar en cuenta que se pueden necesitar obras adicionales en la adecuación de los espacios, vías internas y externas del puerto.

5. Tecnologías de producción de hidrógeno verde y principales métodos constructivos asociados

Actualmente, existen distintas tecnologías utilizadas en aplicaciones comerciales para la producción de hidrógeno. Entre las más desarrolladas se encuentran la electrólisis alcalina (AEL) y la electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM). Otra tecnología en constante investigación y desarrollo es la electrólisis de óxido sólido (SOE), que promete altas eficiencias y flexibilidad, pero con condiciones de operación a temperaturas muy altas (700 a 900°C) y durabilidad limitada.

5.1. Electrólisis Alcalina (AEL)

La AEL es actualmente la tecnología más económica y tiene la vida útil más larga, en parte debido a que son las más antiguas de las tecnologías mencionadas anteriormente. Este tipo de electrólisis ha sido utilizado en la industria durante aproximadamente 100 años (Calado & Castro, 2023, pág. 4), y aunque se espera un progreso adicional, probablemente el desarrollo de PEM y SOE será más rápido. Sin embargo, las AEL tienen algunos desafíos, como que no pueden reaccionar tan rápido a los cambios en la producción debido a la intermitencia de la electricidad, requieren un mantenimiento complejo del líquido alcalino, no pueden operar por debajo de cierto umbral por razones de seguridad, tardan más en arrancar y presentan una densidad de corriente relativamente baja en comparación con las PEM. Además, la presión de salida del hidrógeno producido es más baja, lo que requiere una mayor compresión para el transporte y almacenamiento, reduciendo la ventaja del menor gasto de capital inicial.

La reacción AEL ocurre en una solución compuesta por un electrolito líquido, típicamente hidróxido de potasio, entre dos electrodos. Cuando se aplica un voltaje suficiente entre los electrodos, los iones cargados de manera opuesta (OH^- y H^+) son atraídos hacia los electrodos cargados de manera opuesta. El ánodo acumula agua (a través de la combinación de iones OH^-) mientras que el cátodo produce hidrógeno (Goldmand Sachs International, 2022, pág. 40). En la Figura 17 se muestra un esquema de la electrólisis alcalina.

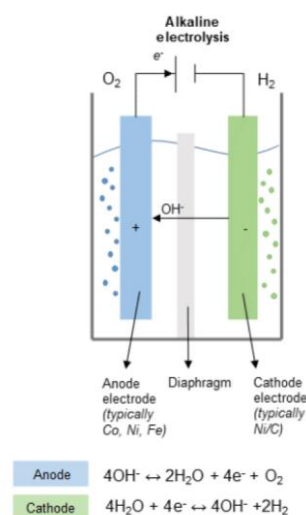


Figura 17. Esquema simplificado de electrólisis alcalina. Fuente: Goldmand Sachs International (2022, pág. 49)

5.2. Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones (PEM)

Las PEM son más recientes que las AEL y tienen varias ventajas, como tiempos de arranque mucho más rápidos, mayor pureza del hidrógeno (>99.8 %), operación más allá de la potencia nominal y una presión de salida más alta (Goldman Sachs International, 2022, pág. 39).

Cuando se combina con una fuente de energía renovable, la capacidad de ajustar fácilmente la potencia para adaptarse a las condiciones y un tiempo de arranque rápido son dos características importantes que permiten que esta tecnología aproveche al máximo las fuentes de energía intermitentes. Durante los períodos de apagado, se requieren cantidades bajas de energía para mantener la operación del sistema; este es un hecho importante a considerar si la electrólisis se mantendrá en alta mar o no estará conectada a la red.

El proceso implica el uso de una membrana de polímero sólido conductora. Cuando se aplica voltaje entre los dos electrodos, el oxígeno en las moléculas de agua crea protones, electrones y O_2 en el ánodo, mientras que los iones de hidrógeno cargados positivamente viajan a través del polímero conductor de protones hacia el cátodo, donde se combinan para formar hidrógeno, como se muestra en la Figura 18. El electrolito y los dos electrodos están empacados entre dos placas bipolares cuya función es transportar agua a las placas, transportar gases de producto fuera de la celda, conducir electricidad y circular un fluido refrigerante para enfriar el proceso.

Los electrolizadores PEM son considerablemente más caros que los AEL y no tienen la misma durabilidad. La razón principal del alto precio es la cantidad significativa de platino e iridio necesaria para construir el conjunto de la electrólisis (Goldman Sachs International, 2022, pág. 39).

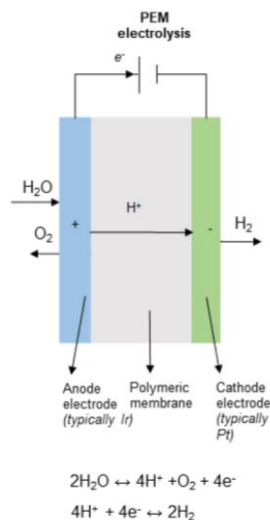


Figura 18. Esquema simplificado de electrólisis PEM. Fuente: Goldman Sachs International (2022, pág. 49)

5.3. Electrólisis de Óxido Sólido

Es la tecnología más reciente entre las tres mencionadas y su uso en aplicaciones comerciales es poco común debido a las elevadas temperaturas de funcionamiento, que

generalmente oscilan entre 700 y 900 °C, y a su menor durabilidad en comparación con las otras tecnologías. A pesar de estas limitaciones, la electrólisis de óxido sólido ofrece la promesa de lograr una eficiencia superior a las demás tecnologías y, a diferencia de la PEM, no requiere metales preciosos, lo que podría resultar en costos de capital más bajos una vez que la tecnología se desarrolle por completo. Aunque las altas temperaturas de funcionamiento pueden ser desventajosas, especialmente en el caso de fuentes de energía intermitentes, no representan un obstáculo significativo cuando se combinan con plantas de energía nucleares o de ciclo combinado. En el contexto de la energía renovable, se está explorando la posibilidad de utilizar la energía solar concentrada junto con la electrólisis de óxido sólido, aprovechando el calor residual para calentar el proceso de electrólisis.

Principalmente, utiliza cerámicas como electrolito y opera a temperaturas muy altas utilizando vapor en lugar de agua, como se muestra en la Figura 19. Su principal beneficio es el potencial de alcanzar eficiencias superiores al 70 % y la necesidad de un menor consumo de electricidad y, por lo tanto, una reducción en el costo de la electricidad.

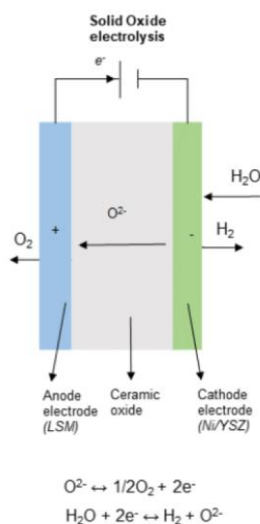


Figura 19. Esquema simplificado de electrólisis de óxido sólido. Fuente: Goldman Sachs International (2022, pág. 49)

De acuerdo con las descripciones anteriores, los electrolizadores PEM pueden representar la mejor elección para un proyecto que utilice como fuente de energía la eólica offshore, en especial por su capacidad de respuesta al ajustar la potencia para adaptarse a las condiciones de intermitencia de la energía eólica, y más aún cuando los proyectos se encuentran aislados de la red eléctrica. Para dimensionar el sistema PEM, la potencia nominal no necesita ser igual a la potencia nominal del parque eólico, ya que el parque eólico podría no pasar largos períodos de tiempo a potencia nominal.

5.4. Configuración del sistema de electrolizadores

Existen dos posibles opciones para la configuración del sistema relacionadas con la ubicación del sistema de electrolizadores: puede ubicarse sobre el agua, cerca del parque eólico offshore, o en tierra, cerca del punto de acoplamiento de la red existente.

5.4.1. Configuración del sistema de electrolizadores offshore

En un sistema donde se evalúe la ubicación del proceso de electrólisis offshore, como se muestra en la Figura 20, se debe identificar la forma más adecuada de configuración para evitar pérdidas de eficiencia.

En el caso de la transmisión de Corriente Alterna de Alto Voltaje (HVAC), como el que se explicó en la sección 4.6, las pérdidas oscilan entre el 1 % y el 5 % para parques eólicos con una potencia nominal de 500 a 1.000 MW y ubicados a 50-100 km de la costa (Calado & Castro, 2023, pág. 7). En el caso de un sistema de Corriente Continua de Alto Voltaje (HVDC), las pérdidas se sitúan entre el 2 % y el 4 %. Como también, Calado & Castro mencionan que el transporte de hidrógeno a través de un gasoducto presenta pérdidas considerablemente más bajas, inferiores al 0,1 %, además de costos iniciales más bajos en comparación con los cables eléctricos submarinos y la electrónica de potencia requerida, por lo que la mejor configuración siempre resultará de un análisis caso a caso.

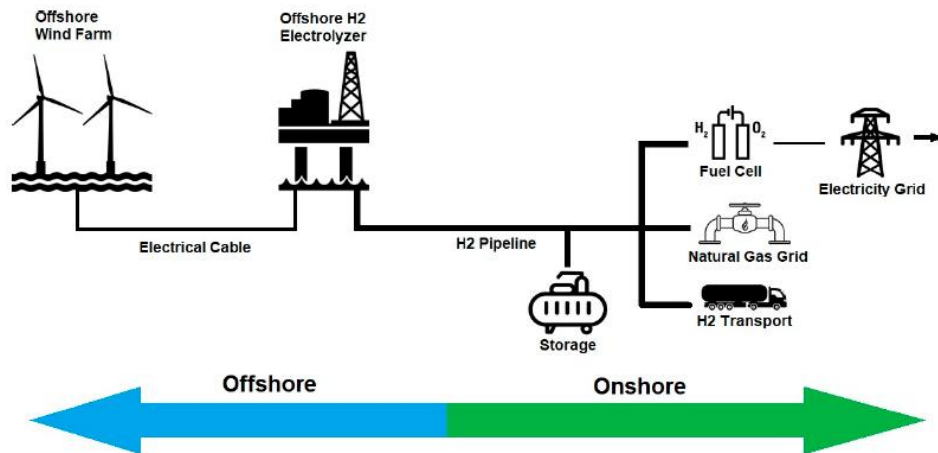


Figura 20. Configuración del sistema de electrolizadores offshore. Fuente: (Calado & Castro, 2023, pág. 7)

De acuerdo con Calado & Castro (2023, pág. 9), existen dos configuraciones posibles para la configuración de un sistema de electrólisis offshore: un sistema de electrólisis centralizado único alimentado por todo el parque eólico o un sistema de electrólisis individuales, uno por aerogenerador.

- a) **Sistema de electrolizadores centralizados:** En este sistema la disposición de los aerogeneradores sigue el patrón típico de un parque eólico offshore convencional, con aerogeneradores ubicados para minimizar las pérdidas debidas al efecto de estela. La energía generada por cada aerogenerador se transmite a una plataforma central a través de cables submarinos estándar.

Una vez que la energía eléctrica llega a la plataforma central, la mayor parte de ella se convierte en corriente continua (CC). La otra parte se utiliza para alimentar las bombas de agua de mar y el compresor de hidrógeno en corriente alterna (CA). La energía en CC se emplea principalmente en la producción de hidrógeno, así como en alimentar la fuente de energía de respaldo y los sistemas auxiliares. El hidrógeno producido sale del electrolizador con una alta pureza y a una

presión constante de aproximadamente 30 bares. Luego, se comprime hasta alcanzar la presión necesaria para introducirlo en los tanques o el gasoducto de exportación, por donde se transporta hacia la costa.

- b) **Sistema de electrolizadores individuales:** En esta configuración Calado & Castro (2023, pág. 9) mencionan que cuando hay suficiente viento, la mayor parte de la electricidad se utiliza para alimentar los electrolizadores y, posiblemente, recargar la fuente de energía de respaldo. El resto de la energía se emplea para alimentar las bombas de agua de mar, que requieren electricidad de corriente alterna (CA). Si no se realiza la compresión en alta mar, el hidrógeno producido sale del electrolizador y se envía a un colector submarino a través de un conducto pequeño. Este colector recopila el hidrógeno de varios sistemas aerogenerador-electrolizador y lo transporta a la costa mediante un conducto de mayor diámetro. En caso de requerir compresión en alta mar, el hidrógeno sale del electrolizador y se envía a un colector en una plataforma, donde se comprime antes de ser transportado a la costa a través de un conducto.

Este enfoque se vuelve más atractivo a medida que la potencia nominal de los aerogeneradores aumenta, ya que se pueden instalar electrolizadores más potentes de forma individual, lo que aprovecha las economías de escala.

5.4.2. Configuración del sistema de electrolizadores en tierra

Este enfoque, también conocido como sistema híbrido según Calado & Castro (2023, pág. 9), implica que la energía generada se transporta a la costa en forma de electricidad mediante cables convencionales. Una vez en tierra, esta energía es empleada para la producción de hidrógeno.

La ventaja principal de este sistema reside en su versatilidad pues se puede suministrar la electricidad directamente a la red eléctrica, como también ser utilizada para alimentar los electrolizadores para generar hidrógeno, además, ya que el electrolizador estará en tierra firme, probablemente se ubicará todo el sistema dentro de un edificio, donde estarán resguardados del clima. Esto también proporciona un entorno de trabajo más adecuado para el personal encargado de la operación y el mantenimiento. Además, como el acceso al electrolizador es mucho más sencillo que si estuviera offshore, los mayores requisitos de mantenimiento y la disminución de la densidad de potencia de un electrolizador de electrólisis alcalina (AEL) no representan un obstáculo tan grande, por lo que el menor gasto de inversión de esta tecnología significa que tanto AEL como PEM son viables cuando el electrolizador se instala en tierra.

A continuación, en la Figura 21 se presenta un esquema general del sistema de electrolizador en tierra.

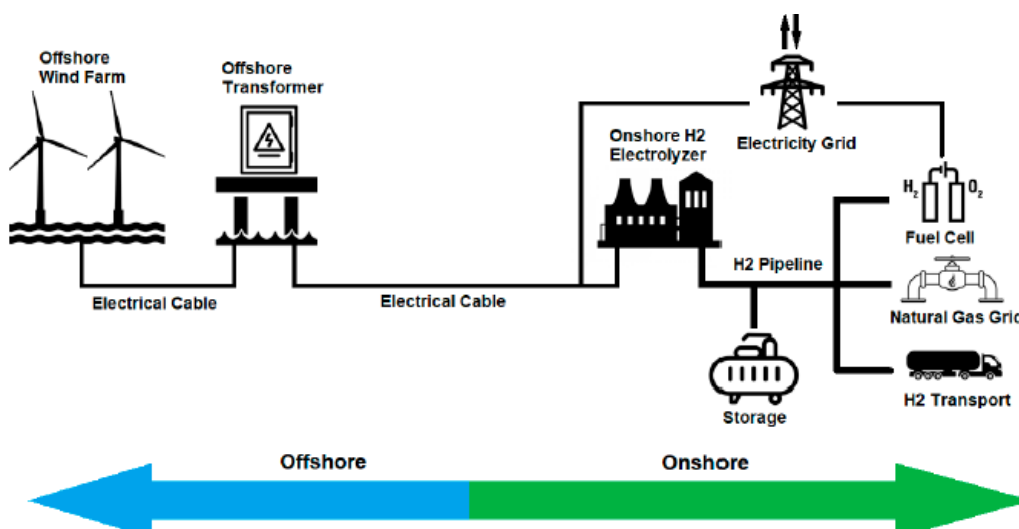


Figura 21. Configuración del sistema de electrolizadores en tierra. Fuente: (Calado & Castro, 2023, pág. 9)

5.4.3. Configuración del sistema de electrólisis dentro del aerogenerador

Los autores Singlitico, Østergaard, & Chatzivasileiadis (2021, pág. 4), definen un tercer escenario en el que los electrolizadores, en combinación con unidades de desalinización, se ubican en el interior o en las cercanías de la torre de cada aerogenerador. El hidrógeno producido se traslada hasta el centro “Hub” a través de tuberías que conectan grupos de aerogeneradores. En el “Hub”, se recolecta el hidrógeno, se comprime y se transporta a la costa mediante una tubería. La Figura 22 muestra este esquema de funcionamiento.

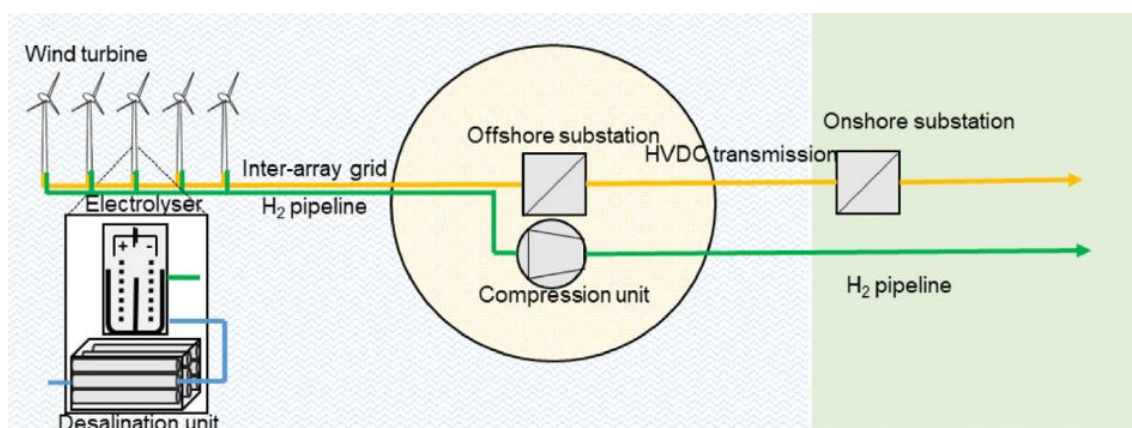


Figura 22. Configuración del sistema de electrólisis dentro del aerogenerador. Fuente: Singlitico, Østergaard, & Chatzivasileiadis (2021, pág. 4)

La transmisión de la electricidad hasta tierra dependerá de la ubicación del proyecto, como se explicó en la sección 4.5. La transmisión en CC es una tecnología más costosa que solo resulta viable cuando los parques eólicos se encuentran lejos de la costa y tienen una alta potencia nominal. En el caso de CA, líneas más largas implican la

necesidad de compensadores de línea reactiva más potentes para tener en cuenta las pérdidas capacitivas, lo que a su vez aumenta el costo. La diferencia de costos disminuye a medida que aumenta la distancia de transmisión. La distancia de equilibrio en la cual CC se vuelve preferible está alrededor de los 50-100 km para cables subterráneos y submarinos.

En cuanto a la fuente de agua, Calado & Castro (2023) mencionan que las dos opciones posibles son conectar el electrolizador a la red de agua dulce, una opción que se debe evaluar en profundidad en Uruguay debido a preocupaciones ambientales en cuanto a la disponibilidad y uso de agua potable para la población, o la instalación de una unidad de desalinización junto al electrolizador, que, en este escenario, parece la opción más adecuada para proyectos que se pretendan instalar en la ZEE de Uruguay.

La elección de la mejor configuración dependerá de las condiciones específicas de cada proyecto. De acuerdo con Siachos (2022, pág. 48), la electrólisis centralizada offshore se percibe como más avanzada que la descentralizada, debido principalmente a que el sector marítimo cuenta con una amplia experiencia en plataformas marinas, con antecedentes que se remontan a la década de 1900 con el desarrollo de plataformas para petróleo y gas en alta mar. En segundo lugar, las estructuras de los parques y los aerogeneradores no requieren modificaciones.

La electrólisis integrada dentro de los aerogeneradores conlleva varios beneficios en comparación con la electrólisis centralizada. En primer lugar, no se requieren grandes plataformas de electrólisis en plataformas offshore, lo que reduce el costo total de la infraestructura. La integración de toda la secuencia, desde el aerogenerador hasta el bloque de electrolizadores, permite eliminar varios componentes eléctricos, lo que resulta en una disminución tanto de las pérdidas eléctricas asociadas (5 - 10%) como de los gastos de capital totales (Siachos, 2022, pág. 49). Por ejemplo, no se necesita un convertidor AC/CC/AC, sino solo un convertidor AC/CC, ya que la electricidad en corriente continua puede alimentarse directamente al electrolizador. Por otro lado, una desventaja de la electrólisis en el aerogenerador, en comparación con la centralizada, es que actualmente no es propicia para conexiones híbridas que permitan la transmisión simultánea de hidrógeno y electricidad.

Los principales componentes que conforman un sistema de electrólisis, y serán aplicables para cualquiera de las configuraciones descritas anteriormente, se describen en la Figura 23 a continuación:

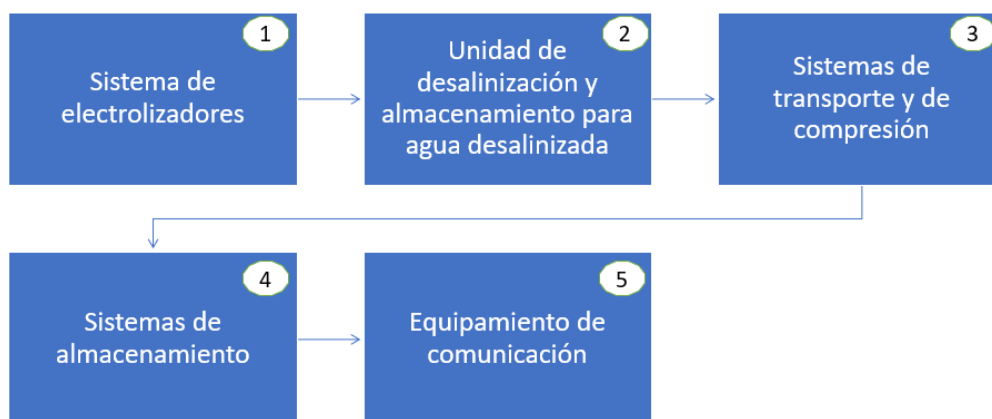


Figura 23. Principales componentes del sistema de configuración de electrólisis offshore centralizada e individual. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Calado & Castro (2023).

5.5. Tecnología del Sistema de Electrolizadores

El primer paso en el diseño del proceso de electrólisis es la selección de la tecnología que sea más adecuada para el proyecto. A continuación, se presenta una tabla comparativa con las ventajas y desventajas de cada tipo de tecnología de electrólisis:

Tabla 10. Ventajas y desventajas de cada tipo de tecnología de electrólisis. Fuente: (Kumar & Himabindu, 2019)

Proceso	Ventajas	Desventajas
Electrólisis alcalina (AEL)	Tecnología bien establecida Catalizadores no nobles Tecnología de bajo costo Eficiencia energética (70–80 %) Comercializada	Densidades de corriente bajas Formación de carbonatos en el electrodo que disminuye el rendimiento de la electrólisis Baja pureza de los gases Baja presión operativa (3–30 bar) Operación dinámica baja
Electrólisis de óxido sólido	Eficiencia superior (90–100 %) Catalizadores no nobles Alta presión de trabajo	En etapa de laboratorio Diseño de sistemas grandes Baja durabilidad
Electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM)	Altas densidades de corriente Diseño de sistemas compactos y respuesta rápida Mayor tasa de producción de hidrógeno con alta pureza de gases (99,99 %) Mayor eficiencia energética (80–90 %) Operación dinámica alta	Nueva y parcialmente establecida Alto costo de componentes Ambiente ácido Baja durabilidad Limitación en la comercialización a corto plazo

En base a este análisis, y tal como se mencionó anteriormente, se podría identificar la tecnología PEM como una de las óptimas para operar en sistemas con configuración de proyectos eólicos offshore, ya que cuenta con altas densidades de corriente se obtienen también mayores rangos de eficiencia de transformación, además su capacidad de respuesta rápida y alta operación dinámica frente a cambios en la entrada de energía, es útil para aplicaciones con fuentes de energía intermitentes como la energía eólica. Esto significa que pueden ajustar rápidamente su tasa de producción en respuesta a cambios en la disponibilidad de electricidad, por lo cual se avanzará de ahora en adelante con el análisis de esta tecnología y sus principales componentes.

La primera electrólisis de agua con membrana PEM fue desarrollada por Grubb a principios de los años 50 (Kumar & Himabindu, 2019, pág. 444), y General Electric Co. la desarrolló en 1966 para superar las limitaciones de la electrólisis de agua alcalina.

En lo que respecta a la sustentabilidad y el impacto ambiental, la electrólisis PEM se presenta como uno de los métodos preferidos para convertir energía renovable en hidrógeno de alta pureza, además de incluir un diseño compacto, una elevada densidad de corriente, una alta eficiencia, una rápida capacidad de respuesta, un requerimiento de espacio reducido, operaciones a temperaturas más bajas (entre 20 °C y 80 °C) y la producción de hidrógeno de una pureza excepcional, además de generar oxígeno como subproducto. Igualmente, la facilidad de equilibrar las plantas de electrólisis de PEM las hace aún más atractivas para aplicaciones industriales.

Los electrocatalizadores de última generación para la electrólisis de PEM emplean metales nobles altamente activos, como Pt/Pd en la reacción de hidrógeno en el cátodo e IrO₂/RuO₂ en la reacción de oxígeno en el ánodo (Kumar & Himabindu, 2019, pág. 446), lo que resulta en un mayor costo en comparación con la electrólisis AEL. Por lo tanto, uno de los principales desafíos en la electrólisis PEM radica en la reducción de los costos de producción, al tiempo que se mantiene un alto nivel de eficiencia.

5.6. Membrana de electrolizadores PEM

Los componentes principales de la celda de electrólisis PEM incluyen los conjuntos de membrana y electrodos, los recolectores de corriente (capas de difusión de gas) y las placas separadoras. El elemento central de la celda de electrólisis es el ensamblaje de membrana-electrodo, que divide la celda en dos medias celdas, una anódica y otra catódica. En la Figura 24 se muestran imágenes referenciales de los componentes de un electrolizador PEM.

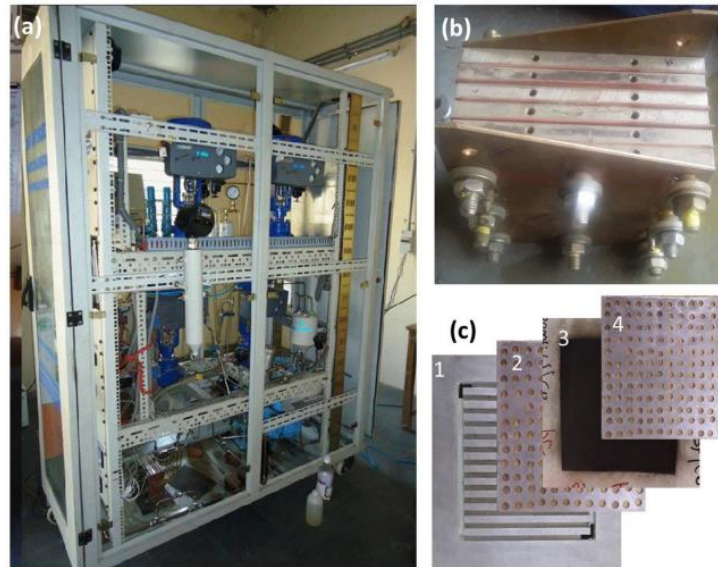


Figura 24. (a) Descripción general del electrolizador de agua PEM típico (b) Pila de celdas PEM (c) Componentes de la celda; 1-Placa bipolar, Colector de corriente de 2-ánodos, 3-MEA, Colector de corriente de 4-cátodos. Fuente: Kumar & Himabindu (2019, pág. 447)

Entre los principales proveedores y modelos de electrolizadores PEM a nivel mundial, de acuerdo con Insiqth (2022), se encuentran los que se muestran en la Tabla 11:

Tabla 11. Principales fabricantes y modelos de electrolizadore PEM

Fabricante	Modelo	Capacidad Producción (Nm ³ /h)	Potencia nominal (MW)	Eficiencia de Consumo (kWh/Nm ³)	Consumo de agua (L/Kg H ₂) ⁽¹⁾	Presión de salida (bar)
NEL (2)	Serie C	10 – 30	Sin información	5.8 – 6.2	9	30
	Serie MC	246 - 492		4.5	9	30
	Serie M	1.968 – 4.920		4.5	9	30
Siemens Energy (3)	Silyzer 300	0.2 - >60	10 - 20	Variable	< 10	10
Cummins (4)	HyLYZER	1000	Sin información	3.6 – 4.5	9	30
Plug Power (5)	EX4250D	1.989	Hasta 10	49.9 (kWh/kg)	10.23	40
McPhy Energy (6)	Serie McLyzer	200 -3200	1 – 16	4,65	9	27 – 30
ITM Power (7)	Trident	Sin información	2	50 (kWh/kg)	Sin información	30
	Neptune		5			20 -30
	Poseidon		20			20 -30
Ohmium (8)	Lotus	9 kg H ₂ /h	Sin información	49 (kWh/kg)	Sin información	27

Notas:

- (1) Agua desmineralizada
- (2) (Nel hydrogen, 2024)
- (3) (Siemens Energy, 2024)
- (4) (Cummins, 2024)
- (5) (Plug Power, 2024)
- (6) (Mcphy, 2024)
- (7) (ITM Power, 2024)
- (8) (Ohmium, 2024)

5.7. Dimensionamiento del sistema de electrolizadores

El dimensionamiento de los electrolizadores debe considerar múltiples factores, particularmente la potencia necesaria para su operación y la disponibilidad de una conexión a la red eléctrica nacional, que permita suministrar energía al electrolizador durante períodos de baja generación eólica. La conexión a la red presenta la ventaja de proporcionar una tasa de producción de hidrógeno más constante; sin embargo, su principal desventaja es la imposibilidad de garantizar un hidrógeno completamente libre de carbono.

Los autores Calado & Castro (2023, pág. 12) resaltan que los principales factores que influyen en el dimensionamiento de las potencias nominales del electrolizador y el aerogenerador son: la velocidad nominal del viento del aerogenerador, la velocidad media del viento en el sitio de instalación, y el coeficiente de forma de la distribución de Weibull. Estos parámetros permiten estimar con precisión la disponibilidad energética, ajustando la producción eléctrica del aerogenerador a los requerimientos de consumo del electrolizador, maximizando así la eficiencia del sistema integrado.

5.8. Unidad de desalinización de agua

La electrólisis PEM precisa de agua de alta pureza. La calidad del agua debe cumplir con un límite máximo de 0.5 ppm de unidades totales disueltas (Ibrahim et al , 2022, pág. 5). Aproximadamente se necesitan entre 9 a 15 litros de agua desmineralizada para producir 1 kg de hidrógeno, como se mostró en la Tabla 2 y en la Tabla 11 de este documento. En los proyectos eólicos offshore y cuando la configuración del sistema de electrólisis seleccionada sea offshore, se recomienda utilizar el agua de mar purificada para el proceso; sin embargo, en los sistemas onshore, el agua se podría obtener a través del suministro de agua de la red pública, aunque esta opción no es muy recomendada.

En los proyectos offshore, el agua de mar debe pasar por un proceso de desalinización, pues la utilización directa de agua de mar en la electrólisis puede ocasionar corrosión y la producción de cloro (Ibrahim, y otros, 2022, pág. 5). En esta situación, los iones de cloruro provenientes de la sal más común en el agua de mar, el cloruro de sodio (NaCl), se encuentran en la solución electrolítica. Esta reacción produce una familia de compuestos corrosivos de cloro, como el gas cloro e hipoclorito, todos los cuales son peligrosos para el ambiente y corroen el ánodo a una velocidad más rápida de lo normal.

Existen varias tecnologías de desalinización comprobadas, y se está evaluando la posibilidad de aprovechar el calor de la unidad de electrólisis para operar una unidad de desalinización térmica; la solución más utilizada es la ósmosis inversa. La ósmosis inversa implica la aplicación de presión a una solución de agua salada y su paso a través de una membrana semipermeable. Esta membrana permite que el agua pase a través de ella, pero no permite que el soluto (las sales disueltas) lo hagan, como se muestra en la Figura 25. El agua fluye desde el lado de mayor concentración de sales hacia el lado de menor concentración de sales a través de la membrana. Como resultado, la parte concentrada de la solución se diluye, mientras que la parte menos concentrada se enriquece.

La ósmosis inversa es una solución que se considera adecuada para su implementación en alta mar y ya se ha utilizado en aplicaciones marítimas. En particular, con la

tecnología de electrólisis PEM, puede funcionar de manera autónoma y puede adaptarse fácilmente a diferentes requisitos de flujo y conductividad.

Una unidad de desalinización generalmente requiere bombear agua de mar. Su demanda energética es relativamente baja en comparación con la electrólisis; el rango de consumo energético para el proceso depende de la salinidad del agua de alimentación, la eficiencia de las bombas y la descarga de salmuera. En general, el consumo específico de energía eléctrica de una planta desalinizadora se encuentra en el intervalo de 2 a 4 kWh/m³ de agua (Ibrahim et al, 2022, pág. 5).

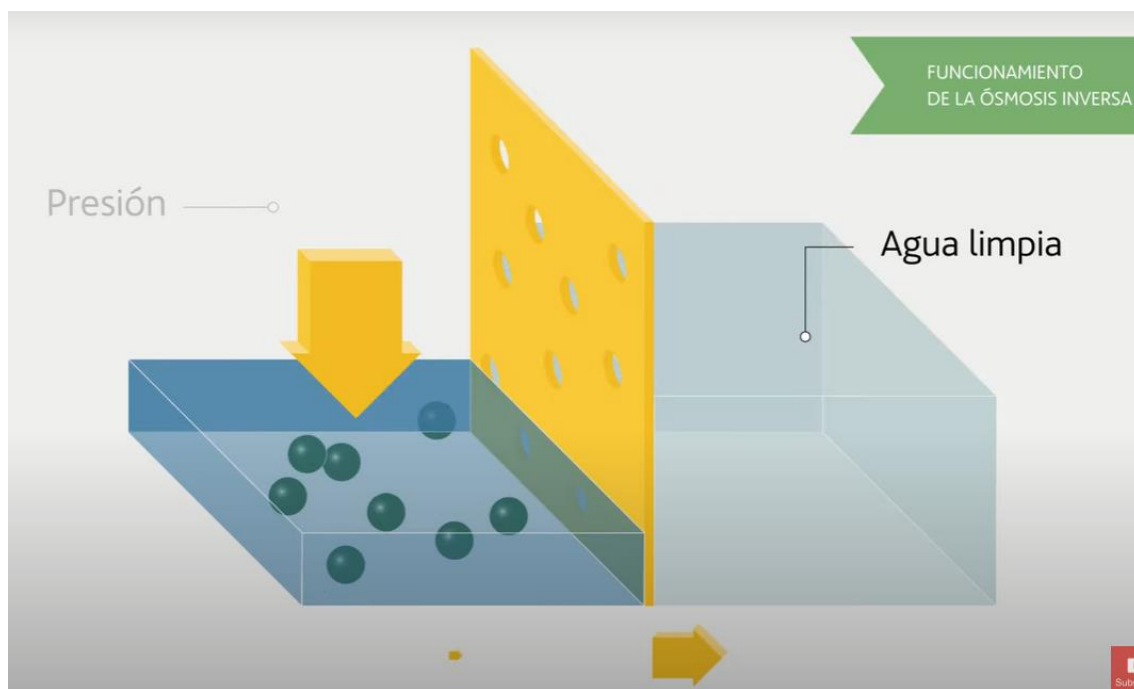


Figura 25. Diagrama básico del proceso de ósmosis inversa. Fuente: Acciona (2019)

Se debe tener en cuenta que la purificación de agua de mar plantea problemas ambientales relacionados con la eliminación de los productos residuales como la salmuera. Cuando se vierte en el mar, los ecosistemas marinos se ven directamente afectados, se deben tomar medidas para evitar la afectación de los hábitats marinos. Los autores Ibrahim et al (2022, pág. 6) señalan que, para resolver los impactos ambientales asociados con las plantas de desalinización, se debe llevar a cabo un riguroso análisis de la caracterización del sitio. A través de modelos, se pueden abordar varios problemas, como el comportamiento de difusión y mezcla de la salmuera vertida, y a partir de estos análisis, se puede encontrar la ubicación adecuada para las instalaciones de desalinización. Dentro del estudio de impacto ambiental se deben desarrollar planes de monitoreo ambiental para garantizar la efectividad de las medidas para proteger el entorno marino de los efectos perjudiciales del vertido de salmuera y tomar medidas de mitigación o correctivas si se detecte un daño ambiental.

Se han identificado casos de reutilización de la salmuera en procesos, ya que, las salmueras contienen ocho sustancias comunes: fósforo, cesio, indio, rubidio, germanio, magnesio, cloruro de sodio y cloruro de potasio. Estos componentes pueden extraerse de manera rentable mediante diversas técnicas (Nuevo, 2020).

En Israel y Grecia, se emplea una técnica conocida como "minería de salmuera" o "brine mining", que consiste en la obtención de sales y productos químicos a partir de fluidos con alta concentración de sal. Esta técnica se utiliza principalmente para la producción de sal de mesa (Nuevo, 2020). Además, la salmuera encuentra un valioso uso en el deshielo de carreteras, ya que la sal es un excelente agente para prevenir la formación de hielo en las vías, pero esta opción no sería muy viable en Uruguay.

Luego del proceso de desalinización, se debe pasar el agua por un tratamiento posterior para que quede con las condiciones mínimas necesarias para la electrólisis PEM, por lo que se deberá incluir un tratamiento químico en un filtro de pulido de resina, que contiene productos químicos para unir iones restantes y otros sólidos disueltos en el agua desalinizada. En el proceso de desalinización, también se incluyen productos químicos para evitar la formación de incrustaciones (Meier, 2014, pág. 6).

5.9. Sistemas de transporte y compresión del hidrógeno

Los proyectos deben evaluar la configuración de producción que se decida utilizar, ya que como se mencionó en la sección 5.4, el costo de la transmisión de energía offshore para la producción de hidrógeno onshore aumenta relativamente rápido con la distancia, mientras que la producción de hidrógeno offshore y su transporte subsiguiente incurre en costos fijos, como plataformas para los electrolizadores e inversores de corriente alterna/continua (AC/CC), lo que conduce a mayores costos de transporte para distancias más cortas en comparación con la transmisión de energía onshore y la producción de hidrógeno en tierra.

La International Energy Agency (2023, pág. 116) menciona que, para distancias inferiores a 300 km hasta la costa, la transmisión de electricidad puede ser más económica que la producción de hidrógeno en onshore y el transporte mediante gasoductos. Sin embargo, para distancias más largas, la producción de hidrógeno en offshore y su transmisión pueden resultar más rentables, especialmente si pueden beneficiarse de las economías de escala de los gasoductos.

En los escenarios en los que el hidrógeno se produce de forma offshore, es necesario transportarlo a la costa para llegar a su destino final. Esta inyección en un gasoducto requerirá una presión de no menos de 50 bares (Siachos, 2022, pág. 51), dado que el hidrógeno saldrá del electrolizador a una presión aproximada de 30 bares, pues son datos estándares de los fabricantes. El requisito de compresión debe tener en cuenta los 20 bares restantes, así como la pérdida esperada de presión a lo largo de la longitud del oleoducto; para lograr este aumento de presión será necesaria la instalación de compresores.

De acuerdo con Siachos (2022, pág. 52), los compresores mecánicos son actualmente el tipo más comúnmente utilizado. Los más empleados son los compresores dinámicos o de desplazamiento positivo. Otra tecnología disponible son los compresores no mecánicos, que presentan numerosas ventajas en comparación con los primeros, como una menor cantidad de piezas móviles y un tamaño más reducido. No obstante, aún no han alcanzado la madurez tecnológica, ya que se encuentran en fase de desarrollo. En la Tabla 12 se presentan los tipos de compresores más utilizados y sus características destacadas.

Tabla 12. Tipos de compresores y sus características. Fuente: Elaboración propia en base a la información de Siachos (2022).

Tipo de compresor			Características
Desplazamiento positivo	Alternativo	Pistón	Basados en un mecanismo de desplazamiento positivo, los compresores alternativos son ampliamente empleados en sistemas de hidrógeno, idealmente para niveles de presión de 30 bares o superiores (Siachos, 2022, pág. 53). El principio de funcionamiento de los compresores alternativos se basa en un movimiento alternativo, comprimiendo y desplazando el gas contenido. Los principales componentes de un compresor alternativo de un solo paso son: un pistón (dentro de un cilindro), un sistema de biela que impulsa el pistón en un movimiento alternativo mediante una biela, y dos válvulas incorporadas en el cilindro: una para la entrada de gas (válvula de succión) y otra para la entrega de gas (válvula de descarga). La biela transforma el movimiento rotativo en lineal, también conocido como movimiento alternativo. La energía necesaria para la compresión la proporciona el sistema a través de una máquina térmica o eléctrica. La principal ventaja de este tipo de compresores es que se trata de una tecnología madura, ya que estos compresores tienen antecedentes de ser utilizados para la compresión de gases, así como su capacidad para manejar una amplia gama de tasas de flujo diferentes. Por otro lado, las desventajas de utilizar compresores alternativos incluyen fuertes vibraciones y ruido debido a sus numerosas piezas en movimiento, así como posibles complicaciones en el mantenimiento por la misma razón.
Dinámico	Centrífugo		Los compresores centrífugos son dispositivos dinámicos y se utilizan principalmente cuando hay un alto caudal de gas y relaciones de compresión moderadas (Siachos, 2022, pág. 54). La forma en que un compresor centrífugo logra el aumento de presión es incrementando la energía potencial a un flujo continuo de fluido. Los compresores centrífugos comprimen el gas contenido mediante el uso de un rotor giratorio con palas radiales. La energía

Tipo de compresor			Características
			cinética se transforma en un aumento de presión a través de un difusor. A diferencia de los compresores alternativos, la relación de compresión del compresor centrífugo está fuertemente influenciada por el peso molecular del gas contenido. En comparación con la compresión de gas natural, el hidrógeno, al tener un peso molecular muy bajo ($PM = 2.02 \text{ g/mol}$), necesita velocidades de punta del impulsor aproximadamente tres veces mayores para ser comprimido. El diseño y desarrollo de un compresor centrífugo de hidrógeno son un desafío técnico complejo, ya que depende de una serie de métricas termodinámicas y mecánicas interrelacionadas.
Otros			Los compresores alternativos de diafragma, también conocidos como compresores de membrana, se utilizan principalmente en estaciones de carga de hidrógeno debido a su capacidad para manejar gases de manera segura y eficiente. Además, los compresores de líquidos iónicos son capaces de lograr altas relaciones de compresión y eficiencias elevadas, lo que los hace ideales para diversas aplicaciones industriales. Los compresores no mecánicos incluyen compresores de hidruros metálicos y compresores electroquímicos, que ofrecen grandes ventajas potenciales para la compresión de hidrógeno, pero aún se encuentran en etapas de desarrollo (Siachos, 2022, pág. 54).

5.10. Sistema de almacenamiento

El proceso de almacenamiento de hidrógeno guarda similitudes con el gas natural; no obstante, presenta algunas diferencias fundamentales. Principalmente, cuando ciertos metales entran en contacto con el hidrógeno, pueden experimentar fragilización por hidrógeno, lo que resulta en un aumento de la degradación y la probabilidad de fallo del material (Calado & Castro, 2023, pág. 5). Otra diferencia para tener en cuenta es el incremento de la fuga, especialmente en estructuras naturales subterráneas como acuíferos, así como en las conexiones entre secciones de tuberías o válvulas, debido al reducido tamaño de la molécula de hidrógeno. Además, la reacción bacteriana se presenta como un inconveniente, ya que algunas bacterias descomponen el hidrógeno, dando lugar a lo que se podría considerar como pérdidas, puesto que la pureza del hidrógeno almacenado disminuye. Los enfoques predominantes para el

almacenamiento de hidrógeno son el almacenamiento gaseoso y el almacenamiento líquido; aunque existen otros enfoques como el almacenamiento químico.

El almacenamiento gaseoso se puede categorizar en dos métodos: mediante tanques manufacturados, generalmente de metal, y mediante almacenamiento en estructuras naturales subterráneas como acuíferos y cavernas de sal. La densidad del hidrógeno guarda una relación inversa y prácticamente lineal con la presión (Calado & Castro, 2023, pág. 7), de manera que un almacenamiento a mayor presión conduce a un volumen más reducido necesario para almacenar una cantidad determinada de gas hidrógeno.

A continuación, en la Tabla 13 se presentan y describen las características de las principales formas de almacenamiento de hidrógeno.

Tabla 13. Descripción de los distintos tipos de almacenamiento de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia a partir de la información de IEA (2021; 2023)

Forma de almacenamiento		Descripción
Gaseoso	Alta presión	El hidrógeno se almacena a altas presiones, generalmente entre 350 y 700 bar, en tanques resistentes y livianos. Es adecuado para aplicaciones de movilidad y estaciones de servicio.
	Baja Presión	Se utiliza para aplicaciones estacionarias y domésticas, donde el hidrógeno se almacena a presiones más bajas, generalmente hasta 20 bar.
Líquido	Criogénico	El hidrógeno se enfría a temperaturas extremadamente bajas (-253 °C) para convertirlo en líquido. Este método se utiliza en aplicaciones de alta densidad energética y transporte a larga distancia.
Sólido	Materiales de Absorción	Ciertos materiales, como los hidruros metálicos, pueden absorber y liberar hidrógeno de manera reversible, ofreciendo un método compacto y seguro de almacenamiento.
	Almacenamiento químico	El hidrógeno se puede almacenar en forma de compuestos químicos, como hidrocarburos o amoníaco. La liberación posterior se logra mediante procesos químicos.
Subterráneo	Cavernas de Sal	El hidrógeno se almacena en cavernas de sal subterráneas, aprovechando la porosidad del salar. Este método es escalable y se utiliza para almacenar grandes cantidades.
	Acuíferos	Similar al almacenamiento en cavernas de sal, se inyecta hidrógeno en acuíferos subterráneos, aprovechando su capacidad de almacenamiento.

6. Procedimientos de operación y mantenimiento (O&M) de las plantas eólicas offshore y plantas de electrólisis PEM

6.1. Parque eólico offshore

Las actividades típicas de operación y mantenimiento de un parque eólico offshore cubren varios aspectos para garantizar la eficiencia del proyecto. De acuerdo con Thomsen (2012, pág. 229), cada fase de un proyecto de este tipo debe ser examinada detalladamente para evitar posibles cuellos de botella, restricciones en las transferencias y mal tiempo que puedan afectar la accesibilidad a los aerogeneradores. También debe considerarse el impacto de posibles tiempos de inactividad si la tripulación no puede acceder a los aerogeneradores. Por lo tanto, Thomsen (2012, pág. 237) identifica como los tres principales problemas relacionados con la estrategia de O&M a los siguientes:

- Flexibilidad en términos de abordar las bases de los aerogeneradores en condiciones climáticas adversas.
- Se necesitan buques offshore adecuados a costos bajos.
- El equipo base de O&M debe estar ubicado lo más cerca posible del parque eólico.

Para un parque eólico offshore, se deben tener en cuenta muchos factores para determinar el lugar óptimo para una base de O&M. Algunos de ellos son:

- La base de O&M debe estar cerca del parque eólico para reducir al mínimo los tiempos de tránsito desde la costa hasta la ubicación. De esta manera, el equipo puede ser movido con poco aviso, aprovechando ventanas climáticas más cortas.
- La base en tierra debe tener varias instalaciones portuarias para apoyar a los buques de O&M.

Además, Thomsen (2012, pág. 225) resalta entre las fases más relevantes del O&M de los parques eólicos offshore las siguientes:

6.1.1. Mantenimiento Planificado

Incluye revisiones anuales para asegurar que los aerogeneradores funcionen conforme a lo previsto. Es esencial para prevenir fallos y maximizar la disponibilidad de los aerogeneradores. Este mantenimiento se realiza en base a un calendario y cubre desde inspecciones visuales hasta el reemplazo de componentes que muestran desgaste. La logística y planificación de estos mantenimientos deben considerar las condiciones meteorológicas y el acceso al sitio, idealmente durante períodos de baja demanda energética o condiciones meteorológicas favorables. En la Figura 26 se muestra una imagen referencial del área de almacenamiento de repuestos en el puerto.



Figura 26. Imagen referencial del área de almacenamiento de repuestos en puertos, para identificar el impacto de espacio necesario. Fuente: Thomsen (2012, pág. 228)

6.1.2. Mantenimiento No Planificado

Surge de fallos inesperados o emergencias. Requiere una rápida movilización de personal y recursos para minimizar el tiempo de inactividad del aerogenerador. Este tipo de mantenimiento puede incluir la reparación de daños por tormentas, fallos en componentes electrónicos o mecánicos, y otros problemas imprevistos. La eficiencia en este tipo de mantenimiento depende de la disponibilidad de piezas de repuesto, la capacidad de diagnóstico remoto y la rapidez de respuesta del equipo de mantenimiento.

Tanto para el mantenimiento planificado, como el no planificado, se requerirá un barco de servicio para llevar a la persona hasta el aerogenerador. Este será un barco pequeño y de alta velocidad, que puede llevar a un número limitado de personas hasta el parque eólico para llevar a cabo trabajos de rutina (Thomsen, 2012, pág. 225).

6.1.3. Reparación de Componentes Mayores

Se refiere al reemplazo o reparación de componentes críticos del aerogenerador, como las palas, el generador o la caja de cambios. Estas actividades son complejas y requieren planificación detallada, embarcaciones especiales con capacidades de elevación pesada, y pueden llevarse a cabo bajo condiciones meteorológicas específicas para asegurar la seguridad de las operaciones.

Este es uno de los grandes desafíos de los parques eólicos offshore, pues cada maniobra que conlleve la movilización de equipos grandes requerirá actividades complejas que traerán sus propios impactos asociados.

6.1.4. Coordinación de Tráfico de Buques

Esencial para la logística de O&M, especialmente en parques eólicos con alto tráfico marítimo. Incluye la gestión del tráfico de embarcaciones de servicio, suministro y reparación, asegurando que las operaciones se realicen de manera segura y eficiente. Esta coordinación ayuda a evitar interferencias entre las operaciones de mantenimiento y otras actividades marítimas.

6.1.5. Gestión Técnica

Implica la administración de las operaciones técnicas del parque eólico, incluyendo la gestión de embarcaciones, cumplimiento de regulaciones, suministro de combustible y provisiones, y mantenimiento general del equipo. Esta gestión asegura que todas las operaciones de mantenimiento se realicen de acuerdo con los estándares de seguridad y eficiencia.

6.1.6. Centro de Operaciones

Supervisa todas las actividades de O&M, utilizando sistemas de monitoreo y control para coordinar las operaciones en el parque eólico. Este centro es crucial para optimizar la respuesta a fallos, planificar el mantenimiento y gestionar los recursos de manera eficiente.

6.2. Sistema de electrólisis

El proceso de producción de hidrógeno verde a partir de una planta de electrólisis PEM implica varias etapas y variables, como se muestra en la Figura 27.

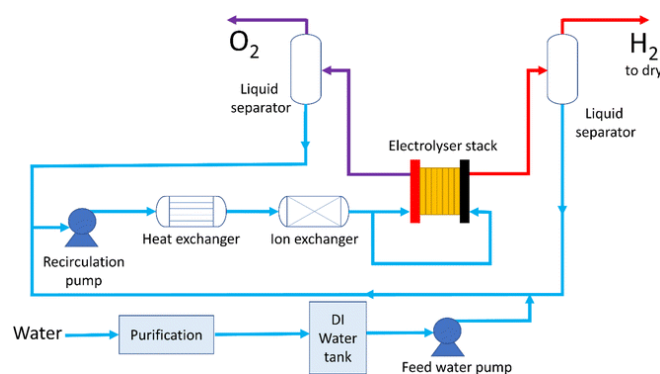


Figura 27. Diagrama de proceso de producción de sistema de electrólisis. Fuente: Sustainable Energy Fuels (2023, pág. 1569)

6.2.1. Suministro de agua

El primer paso implica el suministro de agua, que puede provenir de diversas fuentes como agua desionizada, agua de proceso o agua tratada. La calidad del agua, medida por su pureza, es una variable crítica que afecta la eficiencia y la vida útil de las membranas de la célula PEM, por lo cual se requiere agua de alta pureza.

Se debe identificar cuidadosamente cuál será la fuente de agua, y para cada proyecto específico se debe cuantificar el consumo, para asegurar que no impacte regiones cercanas o procesos existentes.

6.2.2. Preparación del agua

Si el agua suministrada no cumple con los estándares de pureza requeridos, será necesario realizar tratamientos adicionales, como desmineralización, desalinización, filtración o purificación. Según Meier (2014, pág. 6), las membranas PEM pueden operar en óptimas condiciones con un agua que tenga hasta un máximo de 0,5 partes por millón (ppm) de sólidos totales disueltos. En la Tabla 11 se menciona que el consumo de agua promedio para la electrólisis PEM es de 10 litros por cada kilogramo de hidrógeno

producido; sin embargo, esta referencia es para agua desmineralizada. Cuanto menor sea la calidad del agua extraída de una fuente, más cantidad deberá extraerse y tratarse para producir la misma cantidad de hidrógeno. La calidad del agua de origen, especialmente el contenido de sal podría causar variaciones significativas en la tasa de consumo para el pretratamiento del agua, que varía desde un aumento del 66 % para el agua del grifo típica, el 58 % para el agua de río o subterránea, y hasta el 35 % para el agua de mar, según datos compartidos por la industria (IRENA & Bluerisk, 2023).

Cabe destacar que, considerando un proyecto en la ZEE de Uruguay, se puede pensar que se utilizará agua del mar para el proceso. Sin embargo, esta agua deberá pasar por un proceso de purificación, como el de ósmosis inversa, por lo que se debe considerar dónde se dispondrá correctamente la salmuera producida en el proceso. La purificación del agua requiere energía adicional, lo que debe ser considerado en el balance energético global del sistema.

Además, como se mencionó en la sección 5.8, en el proceso de desalinización también se incluyen productos químicos para prevenir la formación de incrustaciones. La complejidad del mantenimiento dependerá de la configuración de operación del sistema de electrólisis (como se explicó anteriormente puede ser offshore o en tierra), ya que el uso de productos químicos es indeseable en las plataformas offshore ya que cambiar o rellenar los productos químicos es inevitablemente más difícil en una plataforma aislada.

6.2.3. Electrólisis

Una vez que el agua está preparada, se inicia el proceso de electrólisis en las celdas PEM. Este proceso implica la aplicación de una corriente eléctrica a través de una pila de celdas, que consiste en celdas individuales separadas por membranas de intercambio de protones. La corriente eléctrica provoca la descomposición del agua en oxígeno e hidrógeno gaseosos. La eficiencia de la electrólisis depende de varios factores, incluyendo el equipo seleccionado, la corriente eléctrica aplicada, la temperatura del proceso, la presión, y la calidad de las membranas PEM.

6.2.3.1. Parámetros para tener en cuenta en el proceso

- a) **Corriente eléctrica:** Se ajusta para controlar la velocidad de producción de hidrógeno y la eficiencia energética del proceso. Valores altos de corriente eléctrica pueden aumentar la velocidad de producción, pero también aumentan el consumo de energía y el desgaste de las membranas PEM. La eficiencia dependerá de cada equipo específico, pero tal como se mostró en la Tabla 11, el ratio de consumo de la mayoría de los fabricantes varía entre 3,6 a 4,5 kWh/Nm³.
- b) **Temperatura:** La temperatura del electrolito afecta la conductividad iónica y la eficiencia del proceso de electrólisis. Valores más altos de temperatura pueden aumentar la velocidad de reacción, pero también pueden provocar degradación térmica de las membranas PEM.
- c) **Presión:** La presión del sistema afecta la solubilidad de los gases y la eficiencia de separación de los productos. Valores más altos de presión pueden aumentar la producción de hidrógeno, pero también aumentan los costos de operación y la complejidad del sistema, tal como se mencionó en la sección 5.9 de este trabajo.

La vida útil de los equipos de electrólisis suele ser de aproximadamente 20 años, ya que está principalmente influenciada por los servicios auxiliares. No obstante, la vida útil del stack es más corta debido a la degradación que sufre con el tiempo. Específicamente, los stacks de membrana PEM tienen una vida útil más breve en comparación con los equipos de electrólisis alcalina (Heymo Ingeniería y Ariema, 2020, pág. 56).

6.2.3.2. Recolección y separación de gases

Los gases producidos durante la electrólisis, hidrógeno y oxígeno se recolectan y se separan en compartimentos distintos utilizando sistemas de recolección y almacenamiento adecuados. La eficiencia de la separación de gases depende de la selectividad y la permeabilidad de las membranas PEM.

La manipulación y almacenamiento de gases inflamables como el hidrógeno pueden plantear riesgos para la seguridad y el ambiente, si no se manejan adecuadamente.

6.2.3.3. Compresión, Almacenamiento y distribución

El hidrógeno se necesitará comprimir solo cuando la presión de salida del electrolizador no es suficiente para su posterior almacenamiento en tanques adecuados, como cilindros de alta presión o depósitos criogénicos, y antes de ser distribuido a los usuarios finales. La compresión del hidrógeno requiere energía adicional, lo que debe ser considerado en el balance energético global del sistema. La presión de salida promedio es de 30 bar, como se mostró en la Tabla 11.

El almacenamiento de hidrógeno puede presentar riesgos de seguridad, especialmente si no se gestionan adecuadamente los posibles escapes o fugas.

6.2.3.4. Control de calidad

Durante todo el proceso de producción, se realizan controles de calidad para garantizar la pureza y la seguridad del hidrógeno producido. Esto puede implicar análisis de composición química, pruebas de resistencia a la presión, y monitoreo continuo de parámetros operativos.

Entre las actividades de O&M más importantes a considerar en los procesos de electrólisis se encuentran:

6.2.4. Inspección y Mantenimiento Regular

Se llevan a cabo inspecciones visuales rutinarias en los equipos y sistemas para detectar signos de desgaste, corrosión u otros problemas. Se programan actividades de mantenimiento preventivo, como la limpieza de electrolizadores, la lubricación de equipos y el reemplazo de partes desgastadas. Se realizan pruebas y calibraciones periódicas en sensores y equipos de medición para garantizar mediciones precisas y confiables.

Los stacks no necesitan mantenimiento continuo debido a la ausencia de piezas móviles, por lo que no se requieren consideraciones especiales en este aspecto. El equipo más crítico en términos de mantenimiento es el compresor, en caso de que se necesite uno en la instalación para alcanzar una presión específica del hidrógeno que no se pueda lograr directamente a través del proceso de electrólisis (Heymo Ingeniería y Ariema, 2020, pág. 57).

6.2.5. Gestión de la Seguridad

Se debe llevar a cabo capacitación regular en seguridad para todo el personal involucrado en la operación y el mantenimiento del proceso. Se implementan procedimientos de trabajo seguro y se cumplen estrictamente las regulaciones de seguridad laboral y ambiental. Se realizan evaluaciones de riesgos periódicas para identificar y mitigar posibles peligros en el lugar de trabajo.

Para prevenir daños causados por errores humanos o fallos eléctricos en la instalación, es esencial que los equipos cuenten con sistemas de detección de incendios y fugas de agua. Además, el acceso al sistema de electrólisis debe ser restringido, permitiendo únicamente la entrada a personal cualificado para realizar actividades de mantenimiento y servicio (Heymo Ingeniería y Ariema, 2020, pág. 57).

6.2.6. Mantenimiento de Equipos Auxiliares

Se realiza mantenimiento regular en sistemas auxiliares como sistemas de purificación o desalinización de agua, sistemas de enfriamiento, sistemas eléctricos, etc. Se llevan a cabo inspecciones preventivas y se realizan reparaciones o reemplazos de equipos según sea necesario para evitar fallas inesperadas.

6.2.7. Gestión de Residuos

Se implementan prácticas adecuadas de gestión de residuos para manejar y eliminar de manera segura los residuos químicos y otros desechos generados durante las operaciones de la planta. Se deben cumplir las regulaciones ambientales locales para garantizar la protección del ambiente y la salud pública.

Los posibles residuos que se pueden obtener son: productos químicos utilizados en el tratamiento del agua, como agentes desalinizantes, materiales degradados o partes desechadas de los electrolizadores, como membranas, electrodos o materiales de revestimiento, residuos generados durante actividades de mantenimiento y reparación, como aceites lubricantes, solventes o materiales de limpieza, aguas residuales generadas durante el proceso de tratamiento, que pueden contener impurezas, sólidos disueltos u otros contaminantes, agua de lavado o enjuague utilizada en la limpieza de equipos y superficies.

Capítulo III. Identificación de Impactos Ambientales de la Producción de Hidrógeno Verde a partir de Proyectos Eólicos Offshore

7. Principales impactos ambientales identificados en proyectos eólicos offshore y de producción de hidrógeno verde

Con el fin de identificar los principales impactos ambientales de los proyectos eólicos offshore y de producción de hidrógeno verde, se realizará la revisión de algunas publicaciones científicas internacionales, resaltando sus principales hallazgos. Los documentos seleccionados abordan temas desde diferentes perspectivas y geografías ofreciendo una visión detallada de los desafíos y oportunidades relacionados con este tipo de proyectos, así como lecciones aprendidas de proyectos realizados en diversas localizaciones.

7.1. Resumen del documento “Offshore Wind Energy: Research on Environmental Impacts” de Köller et al (2006)

Los autores proporcionan un análisis sobre el uso de la energía eólica offshore, destacando la importancia de la investigación ambiental para el desarrollo sostenible de esta fuente de energía.

Mencionan cómo las preocupaciones iniciales sobre los posibles impactos ambientales de los parques eólicos planeados dieron paso a una evaluación enfocada y realista gracias a los proyectos de investigación. El estudio se motivó por las preocupaciones iniciales sobre los impactos ambientales de los parques eólicos planeados, buscando contribuir a una evaluación de estos impactos, resaltando una combinación de investigaciones estándar y Evaluaciones de Impacto Ambiental de cada parque eólico, junto con planes básicos para el monitoreo durante la construcción de los parques. Este enfoque integral permitió la implementación temprana de ciertos requisitos que recientemente se volvieron obligatorios con la introducción del proceso de Evaluación Ambiental Estratégica de la UE.

Principales Hallazgos:

- a) Investigación sobre Aves Marinas y Migratorias:** La investigación proporcionó un análisis detallado de la distribución estacional y geográfica de las 35 especies de aves que descansan y se alimentan en alta mar en los mares del Norte y Báltico de Alemania.

Se desarrolló un índice para obtener estimaciones específicas de la vulnerabilidad de las aves marinas a los parques eólicos marinos, seleccionando nueve factores considerados relevantes en el contexto del riesgo de perturbación y colisión: (1) maniobrabilidad de vuelo, (2) altitud de vuelo, (3) porcentaje de tiempo volando, (4) actividad de vuelo nocturno, (5) perturbación por tráfico de barcos y helicópteros, (6) flexibilidad en el uso del hábitat, (7) tamaño de la población biogeográfica, (8) tasa de supervivencia adulta y (9) estado de amenaza y conservación en Europa. Estos factores representan el comportamiento de vuelo (1 - 4), el comportamiento general (5 - 6) y el estado (7 - 9). Para cada especie, cada factor se puntuó de 1 (baja vulnerabilidad) a 5 (alta vulnerabilidad), resultando en Índices de Sensibilidad de Especies (SSI). Mientras que cinco factores fueron evaluados por datos de investigación, los otros cuatro se estimaron según la experiencia de observaciones en el mar.

Los resultados mostraron que las áreas costeras del sureste del Mar del Norte son las áreas más vulnerables a los parques eólicos.

Los efectos de los parques eólicos marinos en las aves marinas afectan su dinámica poblacional cuando se alteran sus tasas de mortalidad o reproducción, cambiando así el tamaño de la población.

- b) Efectos en Aves Marinas y Migratorias:** Se evaluó la pérdida de hábitat debido al desplazamiento y la evitación de fauna marina, como peces que sirven de alimento para algunas especies de aves; así como la introducción de sustrato duro en un ambiente de fondo blando. Además, se consideró la fragmentación del hábitat causada por desvíos en vuelo y, en menor medida, la mortalidad

aumentada debido a colisiones fatales. Los resultados de operaciones de parques eólicos offshore en Dinamarca y Suecia confirmaron algunas de estas suposiciones para algunas especies de aves marinas, pero no para todas, lo que sugiere la necesidad de investigaciones más focalizadas en la distribución de aves marinas y el desarrollo de métodos de evaluación.

c) Impacto en Aves Marinas y Migratorias:

- Desplazamiento, perturbación o colisión debido a actividades de construcción y operación.
- Cambio en la distribución y densidad de las especies, afectando el uso del hábitat.

En conclusión, dependiendo del riesgo de evasión y el riesgo de colisión, así como de las proporciones de las poblaciones afectadas, el impacto de los parques eólicos offshore en el sector alemán del Mar del Norte sobre las poblaciones de aves marinas varía considerablemente, tanto en la etapa que se encuentra el proyecto, como de la especie de ave que se evalúa. Esto debe tenerse en cuenta en el proceso de aprobación por las autoridades y debería llevar a la aplicación de niveles de umbral para seleccionar sitios de parques eólicos que tengan el menor impacto en las poblaciones de aves marinas.

Los ejemplos anteriores demostraron que, en la evaluación de los efectos de un solo parque eólico, se debe considerar la pérdida de hábitat, además del hábitat ya perdido debido a otros parques eólicos, es decir, se deben considerar impactos sinérgicos y acumulativos. Por lo tanto, esto subraya la necesidad de un enfoque acumulativo al evaluar los impactos en las poblaciones de aves marinas.

d) Impacto en Mamíferos Marinos:

- Daño o desplazamiento por ruido de construcción y operación.
- Afectación por campos electromagnéticos y vibraciones.
- Cambio en la abundancia de algunas especies de peces debido a la introducción de nuevos hábitats (sustratos duros artificiales).
- Daño por dispersión de sedimentos, vibración, o campos electromagnéticos.

La evaluación arrojó que existe preocupación por el daño o desplazamiento de mamíferos marinos debido al ruido de construcción y operación, así como el daño a la fauna de peces por dispersión de sedimentos, vibración o campos electromagnéticos.

Los autores señalan que, debido a los numerosos parques eólicos planificados, las consecuencias sobre la flora y fauna no pueden determinarse considerando solo un parque eólico individual. En su lugar, deben tenerse en cuenta los efectos acumulativos. Un intervalo razonable entre las fases de construcción de parques eólicos separados podría ser una buena medida para minimizar los impactos en el medio marino. Por lo tanto, las licencias para parques eólicos marinos en Alemania contienen una condición que permite a la autoridad de licencias, la Agencia Federal Marítima e Hidrográfica (BSH), coordinar el trabajo de construcción.

Un elemento discutible en el informe fue si los animales se acostumbrarán a los parques eólicos marinos o los evitarán, lo cual presumiblemente depende de cada especie. Los autores mencionan que, en teoría, sería muy difícil evaluar los impactos a largo plazo sobre la reproducción y el estado de la población, y no puede hacerse con el conocimiento actual. Por lo tanto, recomiendan observar de cerca la experiencia futura obtenida de los grandes parques eólicos existentes y planificados. Además, se necesitan más estudios sobre los sistemas sensoriales y sobre factores ambientales como los parámetros oceanográficos para obtener una imagen completa de la ecología de las focas comunes y los delfines, y para entender cómo estos animales reaccionan a las condiciones cambiantes.

e) Impacto sobre especies de peces:

- Los primeros resultados sobre los efectos de los parques eólicos marinos provienen de informes técnicos de parques existentes en aguas del norte. Aunque estas observaciones a corto plazo no pueden predecir tendencias a largo plazo, son útiles para indicar posibles respuestas inmediatas. Por ejemplo, en el parque eólico Horns Rev en Dinamarca, no se encontraron efectos en la composición del sedimento ni en la abundancia de peces a corto plazo.
- Estudios en plataformas petrolíferas desmanteladas han mostrado que los peces se agrupan alrededor de estas estructuras, con densidades significativamente más altas que en áreas más alejadas. Sin embargo, los patrones específicos de especie son complejos y las respuestas varían entre diferentes estudios y ubicaciones.
- Los arrecifes artificiales contruidos con material de desecho o estructuras específicas han aumentado la biomasa y la diversidad de la fauna bentónica y de peces en varias regiones, incluyendo un estudio en la costa holandesa cerca de Noordwijk. Estos arrecifes muestran un aumento constante en la biomasa y diversidad de bentos típicos del Mar del Norte. Las observaciones de altas densidades de peces alrededor de arrecifes artificiales se explican mediante dos hipótesis: la "hipótesis de producción" sugiere que la mayor producción de biomasa en el arrecife eleva las densidades de peces, mientras que la "hipótesis de atracción" sugiere que las agregaciones son respuestas conductuales de los peces atraídos por el arrecife. Probablemente una combinación de ambos procesos sea lo que explica los cambios observados.
- Para estimar los efectos de nuevos parques eólicos en los peces, se combinan registros detallados a largo plazo de peces con información sobre la preferencia de hábitat de varias especies. Se espera que los efectos se limiten a las cercanías de los aerogeneradores, a menos que se afecten directamente especies raras. La cobertura de fondos arenosos probablemente eliminará especies dependientes de hábitats blandos y favorecerá a la fauna de fondos duros y a grandes depredadores.
- Aunque no se anticipa que la instalación de aerogeneradores tenga grandes impactos directos en las poblaciones de peces en aguas alemanas, los efectos a largo plazo en escalas espaciales más pequeñas podrían ser complejos. Su análisis y gestión requerirán un enfoque de todo el ecosistema, incluyendo análisis a largo plazo de ensamblajes de especies, investigación de mecanismos de interacción de especies y cuantificación de procesos en entornos biológicos y físicos.

f) Impacto en Comunidades Bentónicas:

- Daño por “sobre construcción” (varios proyectos construyéndose al mismo tiempo), intercambio de sedimentos y cambio en las comunidades debido a la introducción de sustratos duros.
- Cambio en el carácter de la ocurrencia de peces debido a la introducción de nuevos hábitats (sustratos duros artificiales).
- Daño por dispersión de sedimentos, vibración, o campos electromagnéticos.
- La investigación ha expresado preocupaciones sobre los posibles efectos a largo plazo en el entorno bentónico, especialmente en cómo los hábitats bentónicos naturales cercanos a las construcciones se modifican por cambios inducidos por estas estructuras.

g) Otros Aspectos Ambientales Evaluados:

- Efectos en el paisaje y la visibilidad.
- Influencia en la estratificación del agua, especialmente relevante en el Mar Báltico.
- Posibles contaminaciones marítimas debido a colisiones con buques.

Se señala la falta de conocimiento sobre los efectos de los parques eólicos offshore en hábitats bentónicos y sus comunidades. Los cambios a largo plazo en la composición de las comunidades de especies solo pueden determinarse mediante investigaciones a largo plazo y con referencias a gran escala que superen el alcance de las investigaciones.

7.2. Resumen del documento “Towards understanding environmental and cumulative impacts of floating wind farms: Lessons learned from the fixed-bottom offshore wind farms” de Fatemeh Rezaei (2023)

El autor evalúa los impactos ambientales de los proyectos eólicos offshore en general, centrándose en las lecciones aprendidas de los proyectos con fundaciones fijas y sus implicaciones para los aerogeneradores flotantes.

Los resultados de los estudios de monitoreo mostraron solo impactos locales de los proyectos eólicos offshore en el ambiente marino, ya sea durante su construcción o fases operativas. Sin embargo, se necesita más investigación para determinar si las sinergias de impactos pequeños y locales pueden tener consecuencias a nivel de población. Con el aumento en el número y tamaño de los proyectos, es necesario considerar consecuencias a nivel de población, así como impactos acumulativos de estas actividades en los ecosistemas marinos.

A continuación, se detallan algunos aspectos e impactos significativos presentados por el autor:

- a) Impactos Durante la Construcción y Operación:** Las actividades de construcción, como las operaciones de pilotaje, producen el mayor nivel de perturbación, incluido el ruido submarino, la resuspensión de partículas del lecho marino y la generación de campos magnéticos. Sin embargo, en general, los proyectos han mostrado tener poco impacto en el ambiente en general.

- b) Efectos a Largo Plazo y Recuperación:** Es necesario llevar a cabo programas de monitoreo a largo plazo para evaluar la posible repercusión de los impactos a corto plazo y entender mejor los efectos a largo plazo.
- c) Impactos Acumulativos:** Aunque los estudios sobre las preocupaciones ambientales relacionadas con la industria eólica offshore están creciendo, los impactos acumulativos han sido menos estudiados. Los impactos acumulativos son los impactos incrementales, combinados e interactivos que pueden resultar de actividades humanas repetidas a lo largo del tiempo y el espacio. Los impactos individuales, considerados de manera aislada, pueden ser insignificantes, pero su consideración conjunta puede revelar cambios sustanciales y a veces irreversibles en el ambiente marino.
- d) Impactos en la Biodiversidad y Ecosistemas Marinos:** Se observaron efectos positivos como la creación de arrecifes artificiales por las estructuras de los aerogeneradores que pueden aumentar la biodiversidad y servir como hábitat para diversas especies marinas. Sin embargo, también se mencionan efectos negativos potenciales como la perturbación de especies sensibles debido al ruido y las vibraciones durante la construcción y operación de las granjas eólicas

7.3. Resumen del documento “Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms” de Ibon et al (2022)

El documento presenta un análisis detallado sobre los impactos ecológicos de los proyectos eólicos offshore, reconociendo la energía eólica como una fuente factible para aumentar la producción de energía renovable hacia un suministro de energía descarbonizado. Sin embargo, se enfatiza que las expectativas actuales para la expansión de la producción de energía offshore pueden llevar a impactos ambientales significativos, haciendo vital la evaluación de riesgos ecológicos para los ecosistemas marinos y la adopción de medidas de gestión que minimicen los impactos para la sostenibilidad ambiental del sector.

Se destaca la importancia de que los nuevos proyectos sean compatibles con los objetivos de protección y conservación de la biodiversidad. Además, se identifica una discrepancia entre los riesgos percibidos y los reales, originados en la incertidumbre o la falta de datos sobre los impactos ambientales reales de los aerogeneradores, lo que también lleva a retrasos sustanciales en el proceso de tramitación de permisos.

Los hallazgos clave incluyen la identificación de 867 hallazgos sobre presiones debido a aerogeneradores e impactos en elementos del ecosistema extraídos de 158 publicaciones, mostrando un aumento continuo en el número de publicaciones, lo que se alinea con el aumento de los proyectos offshore y la capacidad de producción instalada. La mayoría de los estudios investigaron presiones únicas, con pocos trabajos abordando la interacción de dos o más presiones producidas.

Se menciona la importancia de considerar los impactos indirectos que no suelen investigarse completamente, como los aumentos en las especies presa en los proyectos offshore, que pueden aumentar la disponibilidad de alimentos para niveles tróficos superiores, alterando así los equilibrios entre poblaciones.

El documento también aborda la necesidad de información científica actualizada, sobre el riesgo de cada interacción potencial entre los proyectos y diferentes elementos del ecosistema para informar a los gestores y responsables de la toma de decisiones durante la planificación. Esto es fundamental para diseñar programas de monitoreo en la ubicación del proyecto, enfocados en elementos del ecosistema con mayor vulnerabilidad a las presiones producidas por los aerogeneradores, e implementar medidas de mitigación en el contexto de los procesos de consentimiento.

Los principales impactos ecológicos identificados en el documento son tanto positivos como negativos y varían según la geografía:

a) Impactos Negativos:

Los impactos negativos fueron los más reportados y están especialmente vinculados a aves, mamíferos marinos, comunidades bentónicas y la estructura del ecosistema. Estos impactos negativos incluyen:

- Cambios en la abundancia de aves debido a la mortalidad por colisión y el desplazamiento.
- Alteraciones en los patrones de distribución y el comportamiento para evitar los proyectos eólicos.
- Impactos significativos en la abundancia y distribución de mamíferos marinos durante las fases de desarrollo de los proyectos, como el comportamiento de evitación con las torres dejando temporalmente el área de construcción.
- La construcción de parques eólicos offshore que puede afectar a los peces, los organismos bentónicos y las especies de plancton.

b) Impactos Positivos:

Los efectos positivos se informan con menos frecuencia y se relacionan principalmente con peces y macroinvertebrados. Estos incluyen:

- Efectos de reserva y arrecife en el área de despliegue de los proyectos y estructuras de amarre, que pueden funcionar como arrecifes artificiales y dispositivos de agregación de peces, atrayendo más vida marina que los arrecifes naturales.
- La prohibición de la pesca de arrastre cerca de los proyectos por razones de seguridad elimina las perturbaciones de peces, bentos y hábitats bentónicos, ofreciendo protección parcial contra la pesca.

c) Presiones sobre elementos del ecosistema e indicadores:

De los hallazgos identificados, las presiones biológicas corresponden a la categoría de presión más estudiada (63 %). Las presiones más frecuentes están asociadas a la perturbación biológica y el incremento de los niveles de presión sonora. La mayoría de los hallazgos relacionados con elementos del ecosistema se informaron para especies (especialmente aves), estructura del ecosistema, funciones y procesos, y hábitats.

d) Tipo y magnitud de impacto: Entre los hallazgos analizados, el 72 % informó impactos negativos, mientras que el 13 % fueron positivos. En cuanto a la magnitud del impacto (positivo o negativo), el 54 % se informó como alto o

moderado, mientras que los impactos bajos o insignificantes representaron el 32 %.

Los tres resúmenes analizados otorgan una visión preliminar de los principales impactos ambientales asociados con los proyectos eólicos offshore. Los tres hacen énfasis en la importancia de la investigación ecológica y la evaluación de impacto ambiental para comprender y mitigar los posibles efectos negativos de estos proyectos en el ambiente marino. Todos ellos reconocen que una comprensión precisa de los impactos es fundamental para desarrollar medidas de mitigación efectivas y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de los proyectos eólicos offshore; además abordan la complejidad de los impactos ambientales, considerando una variedad de impactos que van desde la alteración de hábitats y la perturbación de especies hasta los efectos acumulativos de múltiples proyectos en un área determinada. Esta perspectiva integral refleja la necesidad de considerar los impactos en múltiples niveles, desde el nivel individual de especies hasta el nivel de población y ecosistemas completos, e incluir en todos los análisis el efecto de los impactos acumulativos.

Los tres documentos resaltaron la necesidad de adoptar enfoques integrados de gestión que consideren tanto los impactos negativos como los positivos de estos proyectos, así como la necesidad de desarrollar estrategias de mitigación efectivas basadas en evidencia científica sólida.

7.4. Resumen del documento “Environmental, Health, Safety, and Social Management of Green Hydrogen in Latin America and the Caribbean: A scoping study” de la División de Energía del Banco Interamericano de Desarrollo Chiara Signoria y Marco Barlettani (2023)

El estudio de Signoria & Barlettani (2023), investiga y detalla los riesgos, impactos y estrategias de mitigación asociados con el hidrógeno verde en la región de América Latina y el Caribe, con especial atención en la producción, transporte, y almacenamiento, así como la conversión a portadores de energía como el amoníaco y el metanol. Este análisis se enfoca en una muestra de los países Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Panamá, Trinidad y Tobago, y Uruguay.

El estudio resalta impactos a nivel general y macro espacial, señalando impactos que van a afectar a nivel país y mundial como los siguientes:

a) Afectación a los recursos naturales:

La demanda de agua para la producción de hidrógeno verde es significativa y dependiendo del lugar de producción puede convertirse en un impacto relevante. La evaluación de impacto debe considerar el uso compartido, actual y potencial futuro, del recurso hídrico, analizado a través de modelos de pronóstico adecuados, teniendo en cuenta tanto el nivel actual de estrés hídrico como los efectos a medio y largo plazo del cambio climático, que pueden empeorar las condiciones.

Además, a nivel mundial el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde puede tener impactos potencialmente relevantes en el sector minero, especialmente debido a la alta demanda de metales como el iridio, platino o rutenio necesario para las tecnologías de

electrolizadores PEM, tal como se explicó anteriormente. La minería y refinación de estos metales están asociadas con altas emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos físicos significativos, particularmente en países con áreas de conflicto, lo que plantea serias preocupaciones en términos de derechos humanos de los trabajadores y las comunidades locales.

b) Contaminación del agua:

La desalinización de agua (en el caso de que se utilice una fuente de agua con alta salinidad) puede ser una solución para reducir el impacto de la producción de hidrógeno verde en la disponibilidad de recursos de agua dulce. Sin embargo, la descarga de salmuera puede tener impactos ambientales significativos en los cuerpos de agua receptores, afectando la calidad del agua y la composición y distribución de la biota. Esto puede tener consecuencias sociales de gran alcance, especialmente en comunidades locales que dependen de la pesca para su ingesta de proteínas e ingreso.

Durante el proceso de desalinización, tal como se explicó en el apartado anterior, se generan dos productos: agua desmineralizada y agua residual conocida como salmuera. De acuerdo con los autores, se identificó que la descarga de salmuera puede ocasionar aumento de la salinidad y densidad del agua receptora, lo que puede llevar a una mayor estratificación del agua y reducción del intercambio de oxígeno en la columna de agua, eutrofización debido al enriquecimiento de fosfatos si se agregan polifosfatos y soluciones de limpieza orgánicas a la salmuera; cambios de color de las aguas receptoras, debido a la alta concentración de sustancias férricas; e impacto en la composición y distribución de la biota.

Los autores mencionan además que la legislación actual en países de América Latina y el Caribe que regula la operación de plantas de desalinización y la descarga de aguas residuales es inespecífica. No obstante, existe investigación activa en la región sobre las consecuencias ambientales de la descarga de salmuera, especialmente en Chile, uno de los países más avanzados en esta tecnología. Aunque se ha avanzado en la regulación de la calidad del agua, aún no existe legislación que establezca límites críticos para los componentes químicos o propiedades físicas de la salmuera descargada.

c) Contaminación del suelo:

Se abordan los impactos ambientales significativos sobre el suelo, con enfoques en proyectos en los que la planta de producción de hidrógeno se encuentra onshore y es de gran escala. Mencionan a la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas como riesgos críticos, especialmente en contextos donde las fugas de productos finales como metanol o amoníaco a largo plazo pueden alterar las propiedades químicas del suelo, facilitando la movilidad de iones metálicos hacia cuerpos de agua subterránea. Los autores resaltan la urgencia de adoptar medidas preventivas y correctivas, subrayando la necesidad de realizar evaluaciones ambientales detalladas y diseñar estrategias de mitigación eficaces para proteger los ecosistemas terrestres y acuáticos frente a los avances industriales y tecnológicos.

d) Impactos sociales:

Los autores destacan una serie de impactos sociales significativos entre los que destacan la afluencia de trabajadores externos, la cual ejerce presión sobre los recursos

y la infraestructura locales, perturbando la normalidad de las comunidades y potencialmente aumentando las tasas de violencia y enfermedades transmisibles. Además, se identifican riesgos particulares, en el caso de los proyectos donde la planta de hidrógeno se encuentra onshore, para las comunidades indígenas y locales, quienes podrían enfrentar la pérdida de sus tradiciones, desplazamiento y erosión cultural debido a la transformación de sus tierras y recursos.

Por otro lado, los autores señalan el potencial de impactos sociales positivos derivados de proyectos de hidrógeno verde bien gestionados, como el desarrollo de capacidades locales, mejoras en el acceso a la electricidad y a servicios básicos en áreas remotas y desatendidas. Estos beneficios pueden contribuir significativamente a la resiliencia energética y al bienestar general de las comunidades locales, subrayando el potencial de los proyectos para actuar como impulsores del desarrollo sostenible.

e) Seguridad Industrial:

Los autores mencionan que las instalaciones que manejan hidrógeno, amoníaco o metanol, deben tener planes de seguridad y manejo de productos estrictamente elaborados, resaltando que un accidente con un derrame de sustancias tóxicas puede tener consecuencias devastadoras para las comunidades vecinas. Se enfatiza el cumplimiento riguroso de las regulaciones existentes para la certificación de vehículos y las modalidades de carga y descarga, así como la importancia de la formación de operadores, incluida la gestión de emergencias, para aumentar la seguridad en el transporte de sustancias peligrosas. Además, se menciona la necesidad de un marco legal común en la región de América Latina y el Caribe para asegurar la distribución segura de mercancías peligrosas.

La planificación de la ubicación de las plantas, con la creación de zonas de amortiguamiento entre proyectos industriales y áreas urbanas o comerciales, junto con el establecimiento de sistemas de gestión de seguridad y la aplicación de métodos de evaluación de última generación, son fundamentales para mitigar riesgos y proteger tanto a las instalaciones como a las comunidades.

7.5. Resumen del documento “Identificación de aspectos ambientales, sectoriales y territoriales para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde en toda su cadena de valor”, del GIZ, Ministerio de Energía de Chile y Servicio de Evaluación Ambiental de Chile

El documento del Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, GIZ (2020) menciona los aspectos ambientales, sectoriales y territoriales relevantes para el desarrollo de proyectos diferentes, evaluando resultados de nueve proyectos piloto ubicados entre Australia, Canadá, España, Estados Unidos, Italia e India.

Los principales impactos y medidas identificadas en estos proyectos se resumen en la Tabla 14 a continuación:

Tabla 14. Resumen de los principales impactos ambientales y medidas presentadas en el estudio de Identificación de aspectos ambientales, sectoriales y territoriales para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde en toda su cadena de valor, del GIZ. Fuente: Elaboración propia a partir de información del informe de GIZ (2020).

Aspecto	Impacto	Medida
Uso del Agua y Gestión de Aguas Residuales	Necesidad de agua de alta pureza para procesos de electrólisis. Efectos de la descarga de salmuera en la calidad del agua marina. Generación de agua residual por el proceso de electrólisis. La electrólisis PEM puede generar residuos, como membranas de electrodos usadas y otros materiales de desecho. Estos residuos deben ser gestionados adecuadamente para evitar impactos ambientales negativos.	Uso de plantas de desalinización existentes; tratamiento y reciclaje de agua para reutilización; La salmuera producida por el proceso de desalinización del agua es manejada y tratada para minimizar su impacto ambiental, incluyendo la dilución adecuada de la salmuera antes de su disposición al medio marino para asegurar que se cumplan los estándares de calidad del agua y evitar daños a los ecosistemas acuáticos. Tratamiento de aguas residuales del electrolizador; opciones de reutilización para riego o procesos industriales.
Seguridad del Hidrógeno y Riesgos Asociados	Riesgos de incendio o explosión por fugas de hidrógeno.	Se recomienda realizar análisis de riesgos y consecuencias. Se deben diseñar las instalaciones con medidas de seguridad como zonas de seguridad y muros cortafuegos. Hay que asegurar que los proyectos cuenten con procedimientos de operación segura y planes de emergencia. Garantiza que los tanques de almacenamiento cumplan con las normas técnicas y realizar análisis de escenarios de fallo y diseño basado en seguridad.
Infraestructura de Gas Natural	Mezcla de hidrógeno con gas natural y distribución.	Evaluar que exista compatibilidad con infraestructura existente; Cumplir con estándares de seguridad y calidad del gas.

Aspecto	Impacto	Medida
Permisos y Regulaciones Ambientales	Requisitos de permisos ambientales y de construcción para nuevas instalaciones.	Cumplir con la aplicación para permisos según regulaciones locales y nacionales; Realizar detallados estudios de impacto ambiental.
Aceptación y Percepción Pública	Preocupaciones de la comunidad sobre impactos ambientales y de seguridad.	Realizar consultas públicas y eventos de comunicación; Divulgar de información sobre seguridad y beneficios ambientales.
Emisiones Atmosféricas	Emisiones derivadas de la operación de plantas y transporte.	Realizar análisis de emisiones y cumplimiento con límites de emisiones; Elaborar estrategias de reducción de emisiones.
Transporte y Distribución de Hidrógeno	Logística de transporte de hidrógeno a clientes o infraestructura.	Realizar planes de logística y diseño seguro de vehículos de transporte; Definir rutas de transporte y protocolos de seguridad.
Impacto en Flora, Fauna y Sitios de Patrimonio	Potencial afectación a ecosistemas locales y sitios de valor cultural.	Realizar estudios de impacto específicos; Implementar medidas de mitigación y compensación ambiental.

7.6. Resumen del documento “Environmental Assessment of Electrolyzers for Hydrogen Gas Production” de Camila Sundin (2019).

El estudio de Sundin (2019), proporciona un análisis de los impactos ambientales asociados con diferentes tecnologías de electrolizadores, mediante la revisión de evaluaciones de ciclo de vida. La autora se enfocó en tecnologías alcalinas y de membrana de intercambio de protones (PEM).

El documento destaca la variabilidad en los impactos ambientales según la fuente de energía utilizada durante la fase de operación de los electrolizadores, especialmente la energía eólica. Un hallazgo importante es que la construcción de las infraestructuras necesarias, incluyendo aerogeneradores y estaciones de reabastecimiento, tiene emisiones atmosféricas asociadas que pueden ser significativas, aunque el hidrógeno todavía presenta un potencial significativo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles convencionales. Además, concluye que la tecnología PEM, particularmente con el uso de membranas de polímero modernas, muestra un impacto ambiental menor en comparación con los electrolizadores alcalinos tradicionales en todas las categorías de impacto estudiadas.

Se destaca que la fase de construcción de los electrolizadores es identificada como una fase con un impacto ambiental considerable en varias categorías. Los resultados muestran que la construcción del electrolizador alcalino tiene el mayor impacto en la

categoría de impacto de potencial de destrucción del ozono. También tiene un efecto significativo en otras categorías como potencial de acidificación y eutrofización de agua dulce. Sin embargo, se concluye que la fase de operación, con el suministro de electricidad, tiene el mayor impacto ambiental en general. Además, se reconoce la importancia de considerar la densidad de corriente y la vida útil de los electrolizadores en la evaluación de su desempeño ambiental, señalando hacia la optimización de estas tecnologías.

8. Análisis de los impactos ambientales generales en cada fase del proyecto

Para avanzar con el análisis de los posibles impactos ambientales, se procederá a identificar las actividades con potencial de causar impactos en cada etapa del proyecto. Además, se determinarán los medios y factores ambientales asociados a cada actividad, utilizando la información de referencia de los proyectos y la bibliografía consultada en la sección 7.

De acuerdo con Zaror (2000, págs. 4-1), los factores ambientales son diversos componentes del ambiente susceptibles de ser modificados por la acción humana. Estos factores se categorizan según el Medio al que representan, el cual puede ser Medio Físico, Medio Biótico o Medio Antrópico. Los factores ambientales que se evaluarán dentro de cada Medio son los siguientes:

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

A continuación, se identificará la relación de cada actividad del proyecto con los efectos potenciales en el Medio, así como los posibles impactos ambientales en sus diferentes etapas de vida: desarrollo, construcción y operación. Posteriormente, se analizarán los impactos ambientales en función de su grado de incidencia, determinando cuáles son los que potencialmente generan mayor afectación en cada fase del proyecto y cuáles son los factores ambientales más afectados.

Es importante mencionar que la evaluación específica de los impactos ambientales requiere la incorporación de elementos adicionales, como la frecuencia, intensidad y contexto ambiental para proponer medidas efectivas. Por ejemplo, un mismo impacto ambiental, como la "Afectación de la Calidad del Aire debido a emisiones de CO₂ por el uso de maquinaria", puede manifestarse de manera diferente en distintas actividades. En un proyecto específico puede ser que en una actividad esto ocurra durante una hora y un solo día, y en otra actividad puede ocurrir todos los días durante 12 horas durante un mes, por lo cual, las medidas de la segunda actividad deben ser más concretas, fuertes y específicas. Ese análisis queda fuera del alcance de esta investigación, ya que

solamente se está haciendo un análisis general que permite identificar los posibles impactos ambientales más relevantes en la ZEE para este tipo de proyectos.

El enfoque de la metodología propuesta permite ofrecer recomendaciones significativas, analizando la mayor cantidad de actividades de los proyectos, lo que facilita el seguimiento y análisis posteriores.

A continuación, en la Figura 28 se muestra un flujograma de la metodología de evaluación propuesta.

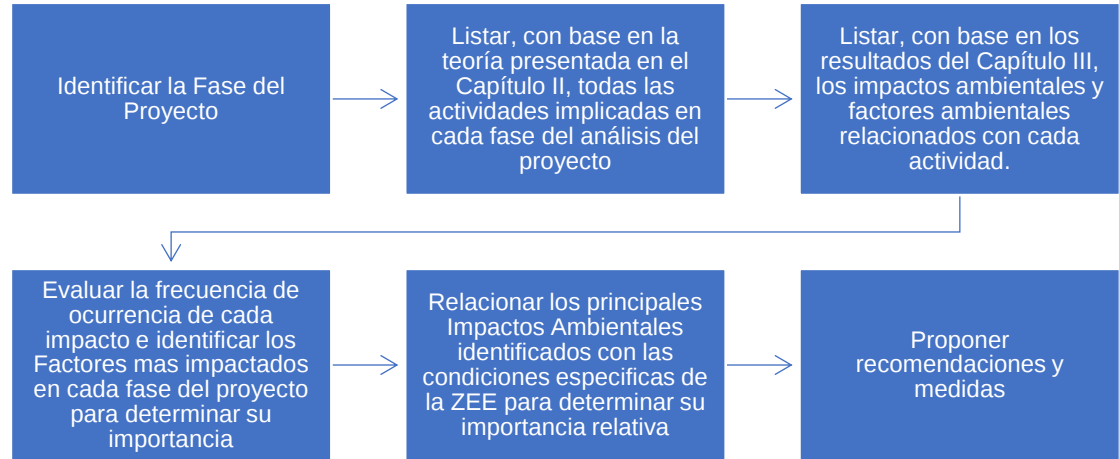


Figura 28. Metodología propuesta para la evaluación de ocurrencia de Impactos Ambientales.

Tal como se estudió en el Capítulo II, existen diferentes alternativas de ingeniería y tecnología para la instalación de proyectos eólicos offshore para la producción de hidrógeno verde, y en cada caso va a depender de las condiciones específicas de la zona y las características ambientales, sociales y económicas que se encuentren.

8.1. Fase de desarrollo

En la siguiente Tabla 15 se presentan las actividades que pueden ocurrir en cada fase del proyecto con sus posibles impactos y los factores ambientales potencialmente afectados:

Tabla 15. 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)
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	Aumento del tráfico marítimo por el paso de las embarcaciones presentes en el área de estudio
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Puede haber emisiones atmosféricas por la operación de las embarcaciones de estudio
	Afectación de la calidad del agua	Físico	Calidad del agua	Posibles derrames de las embarcaciones de estudio o movimientos de sedimentos que aumenten la turbidez del agua

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor ambiental	Vinculación
	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	Los estudios geotécnicos pueden afectar negativamente a los hábitats marinos debido a la alteración del lecho marino, la suspensión de sedimentos, el ruido submarino, el riesgo de contaminación y el daño directo a la fauna (Congressional Research Service, 2024)
Estudios ambientales	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	Aumento de los niveles de ruido por perturbaciones durante la realización de los estudios in situ
	Alteración de fauna y flora marina	Biótico	Fauna y flora marinas	Se pueden ocasionar perturbaciones a la flora y fauna marina por de estudios específicos que pueden incluir la captura de especies y uso de pesca de arrastre como toma de muestras de lecho marino, entre otros.
	Alteración del lecho marino	Biótico	Fauna y flora marinas	
	Mortalidad o lesiones de aves por colisión	Biótico	Aves	Las actividades como la navegación, la instalación de infraestructuras y la presencia de embarcaciones, pueden afectar los patrones de vuelo y la presencia de aves marinas en la zona
	Perturbación de aves costeras	Biótico	Aves	La construcción de infraestructuras costeras, el tráfico marítimo y el desarrollo urbano, pueden afectar los hábitats y el comportamiento de las aves que dependen de las zonas costeras.
	Alteración de Fauna Marina	Biótico	Fauna marina	Puede ocurrir alteración de la fauna marina por perturbaciones durante la realización de los estudios in situ

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor ambiental	Vinculación
	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	La alteración del lecho marino, la suspensión de sedimentos, el ruido submarino, el riesgo de contaminación y el daño directo a la fauna
Estudios del recurso eólico y metoceánicos	Afectación de la calidad del agua	Físico	Calidad del agua	Durante las actividades de estudios, pueden ocurrir posibles derrames de las embarcaciones utilizadas en el proyecto y movimiento de sedimentos durante las actividades de estudio. Estos derrames pueden introducir contaminantes al agua, mientras que el movimiento de sedimentos puede aumentar la turbidez del agua, afectando negativamente a la calidad del agua.
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	Debido al aumento de la actividad de las embarcaciones utilizadas en el proyecto. Este incremento del tráfico marítimo puede conllevar riesgos de colisión, interferir con las rutas de navegación existentes y aumentar la congestión en las zonas marítimas cercanas al área de estudio.
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	La presencia de embarcaciones y actividades de exploración puede causar afectación en la fauna marina. El ruido submarino generado por los equipos de sondeo y las embarcaciones puede perturbar a los mamíferos marinos, como ballenas y delfines, así como a otros organismos sensibles, como peces y tortugas marinas.
	Alteración de Fauna Marina	Biótico	Fauna marina	
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Las embarcaciones utilizadas para la exploración pueden emitir contaminantes atmosféricos, contribuyendo a la contaminación del aire en la zona.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor ambiental	Vinculación
				Los motores de las embarcaciones y otros equipos de apoyo pueden generar emisiones de gases de escape y partículas, incluyendo óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y material particulado.
	Alteración del lecho marino	Biótico	Fauna y flora marinas	La instalación de las bases de las torres de medición de viento puede provocar la remoción de sedimentos y la perturbación de la flora y fauna que habitan en el fondo marino.
	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	
	Mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión	Biótico	Fauna marina	Durante la realización de estudios de medición de vientos, se instala una unidad fija que toma medidas las 24 horas del día. Esta instalación, ya sea una torre o una boya, puede representar un obstáculo para la fauna marina
	Mortalidad o lesiones de aves por colisión	Biótico	Aves	La presencia de embarcaciones y actividades de monitoreo puede aumentar el riesgo de colisión para las especies marinas, incluyendo mamíferos marinos, aves marinas y peces
	Perturbación de aves costeras	Biótico	Aves	Las actividades de exploración y el tráfico marítimo pueden perturbar a las aves costeras que utilizan las áreas costeras y marismas como hábitats de alimentación, reproducción y descanso
	Alteración del paisaje	Antrópico	Paisaje	Dependiendo de la ubicación de la unidad de medición puede alterar el paisaje

Durante la fase de desarrollo, se identificaron varios posibles impactos ambientales y se evaluó su frecuencia de ocurrencia. En la Figura 29 se puede observar un gráfico de frecuencia donde se identifican los posibles principales impactos ambientales de la fase de desarrollo, de acuerdo con su frecuencia de ocurrencia.

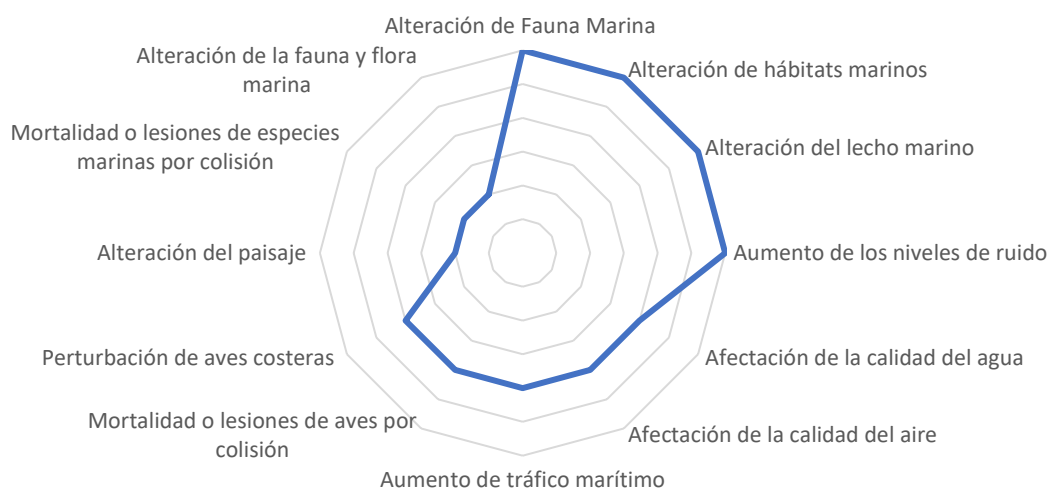


Figura 29. Principales impactos ambientales identificados en la Fase de Desarrollo.

Los impactos ambientales más frecuentes durante esta fase están relacionados con la alteración de la fauna marina, y especialmente debido por el posibles aumento de los niveles de ruido que pueden ser producidos por los equipos para los estudios geofísicos y geotécnicos, tal como se mencionó en la sección 4.1.4; específicamente, los equipos de estudios geotécnicos pueden ser altamente invasivos. Además, de acuerdo con Congressional Research Service (2024), otros de los métodos utilizados son los siguientes:

Estudios sísmicos de aire comprimido de gran penetración: Utilizan pulsos de sonido de baja frecuencia para penetrar profundamente en el subsuelo, reflejándose hacia receptores que captan datos para predecir características geológicas profundas. (BOEM. Bureau of Ocean Energy Management, 2018, pág. 1)

Estudios geofísicos de alta resolución (HRG): Adecuadas para la exploración de la ubicación de energías renovables y la identificación de recursos de arena y grava. Estos estudios utilizan ondas sonoras que se reflejan en estructuras submarinas para recopilar datos sobre las condiciones del lecho marino y subsuelo poco profundo. (BOEM. Bureau of Ocean Energy Management, 2018, pág. 1).

Los otros impactos ambientales de más relevancia en esta fase del proyecto son la alteración de hábitats marinos y la alteración del lecho marino, ya que durante la presencia de embarcaciones y actividades de exploración puede causar afectación general en la fauna marina. El ruido submarino generado por los equipos de sondeo y las embarcaciones puede perturbar a los mamíferos marinos, como ballenas y delfines, así como a otros organismos sensibles, como peces y tortugas marinas.

La instalación de las bases de las torres de medición de viento, o la instalación de bases para las boyas, puede provocar la remoción de sedimentos y la perturbación de la flora y fauna que habitan en el fondo marino. Esto sugiere que, principalmente estas actividades pueden tener un impacto significativo en el ambiente durante la fase de desarrollo.

Además, se identificaron impactos ambientales como la perturbación de aves, el aumento de tráfico marino y la afectación de la calidad del aire y del agua. Estos impactos son relevantes pues impactan directamente en la biodiversidad y en la calidad de los recursos naturales durante esta fase. También se observa que otros impactos que podrían ser relevantes son la mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión con embarcaciones o equipos y la alteración de fauna y flora marina por métodos usados en los estudios, ya que algunos estudios requieren la captura o recolección de especies; por último la alteración del paisaje que, aunque su frecuencia es menor, no deben pasarse por alto, ya que también pueden tener impactos significativos en el medio antrópico. El medio más afectado en esta fase es el medio biótico, con un alto efecto sobre la fauna marina, como se muestra en la Figura 30.

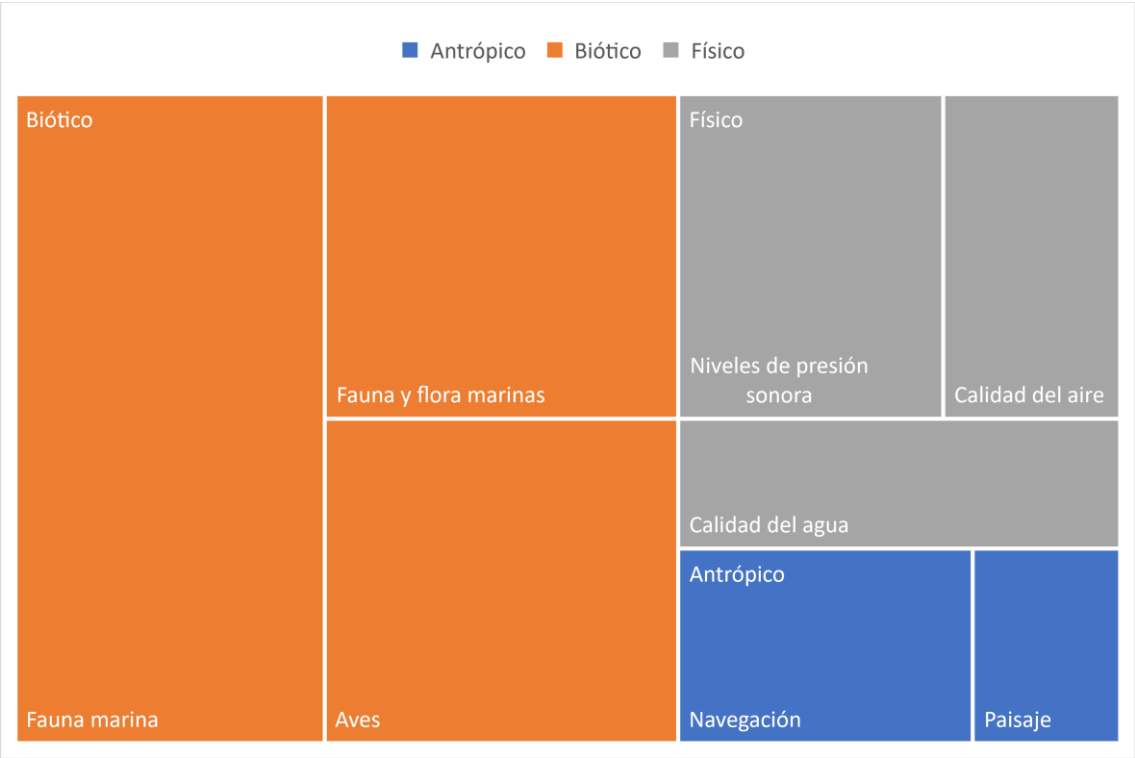


Figura 30. Principal Medio afectado y Factores Ambientales más impactados en la Fase de Desarrollo.

Es razonable que durante la fase de desarrollo el medio más impactado sea el biótico debido a que esta etapa se caracteriza por actividades que no implican una remoción intensiva de suelos ni un alto nivel de tráfico marino. En cambio, se centra en estudios y actividades que pueden perturbar directamente la normalidad de las especies que habitan en la zona y la biodiversidad marina. Además, la presencia de equipos de investigación y la realización de muestreos que utilicen ondas de ruido o vibraciones, también pueden alterar los patrones de comportamiento de la fauna local.

8.2. Fase de construcción

Tabla 16 describe los impactos y factores ambientales identificados para las actividades asociadas con la fase de construcción del proyecto eólico offshore y plantas de electrólisis PEM tanto en su configuración en tierra como en el mar. Las actividades consideradas incluyen la preparación del sitio base, dragado, transporte de materiales al sitio, construcción de fundaciones, instalación de torres eólicas, plantas de electrólisis PEM, instalación de cables submarinos, y conexión a la red eléctrica y de agua. Los aspectos varían dependiendo de la ubicación (onshore u offshore) y el tipo de actividad realizada.

Tabla 16. Actividades que pueden ocurrir en fase de construcción del proyecto con sus impactos y factores ambientales relevantes

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
Preparación del sitio base Onshore (Puerto o zona de almacenamiento de materiales)	Alteración del suelo onshore	Físico	Suelo	Tal como se mencionó anteriormente, los proyectos offshore necesitan una base logística en tierra. La preparación del terreno para esta base puede ocasionar alteración del suelo por los posibles movimientos de tierra para adecuación del sitio base.
	Afectación de la capa vegetal	Físico	Suelo	La preparación del sitio base puede llegar a necesitar la remoción de capa vegetal por las actividades de movimientos de tierra para adecuación del sitio base.
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Durante las actividades de preparación del sitio puede ocurrir un aumento en las emisiones de gases de vehículos y maquinaria, como también posible aumento del material particulado por movimientos de tierras.
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	La operación de maquinarias y equipos puede aumentar los niveles de presión sonora del ambiente.
	Afectación de la flora y fauna onshore	Biótico	Fauna y flora terrestre	Las actividades de movimiento de tierras pueden afectar la flora y fauna del sitio base.
	Perturbación de aves costeras	Biótico	Aves	Las aves que habitan las costas pueden verse afectadas o desplazadas por el aumento de los niveles de presión sonora, debido a las actividades de construcción y cambio en hábitats costeros.
	Aumento de Tráfico carretero	Antrópico	Tráfico	Puede ocurrir un aumento en el tráfico terrestre por las necesidades de movimiento de vehículos, materiales y equipos para el acondicionamiento del área y preparación del sitio base.
	Alteración del paisaje	Antrópico	Paisaje	Es fundamental evaluar el sitio donde se instalará la infraestructura portuaria, ya que puede haber impactos visuales o restricciones al

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
				acceso público a las playas, esto puede ocasionar un impacto a la población.
Dragado (solo si fuera necesario)	Afectación de la calidad del agua	Físico	Calidad del agua	Durante la operación de embarcaciones pueden ocurrir posibles derrames de hidrocarburos o aguas residuales que afecten la calidad del agua o contribuyan a un aumento de la turbidez y los SST por el movimiento de sedimentos. Además, durante las actividades de dragado, puede ocurrir un aumento temporal pero considerable de la turbidez del agua y de la concentración de SST.
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	El aumento en el uso y tránsito de embarcaciones en las áreas del proyecto, pueden afectar la calidad del aire por las emisiones de gases de combustión provenientes de la operación de los equipos.
	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	Las actividades de dragado podrían contribuir con la pérdida de hábitats por la remoción del lecho marino
	Mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión	Biótico	Fauna marina	El aumento en el uso y tránsito de embarcaciones podría ocasionar accidentes de impactos de fauna marina con embarcaciones, resultando en fuertes lesiones o mortalidad de la especie.
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	Las actividades de dragado pueden generar un aumento en los niveles de ruido en el entorno marino, perturbando a la fauna marina.
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	Puede haber un aumento del flujo de embarcaciones en el área del proyecto debido a las actividades de dragado. Este aumento del tráfico marino podría llegar a afectar a otros sectores productivos.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Alteración de Fauna Marina	Biótico	Fauna marina	La fauna marina puede verse afectada por las perturbaciones durante las actividades de dragado, alterando su comportamiento y hábitats.
	Pérdida de biodiversidad	Biótico	Fauna y flora marinas	El proceso de dragado implica la remoción de sedimentos del lecho marino, lo que puede destruir o alterar los hábitats naturales de una variedad de organismos marinos, incluyendo plantas, invertebrados y peces. Además, pueden modificar la composición y estructura del lecho marino, impactando negativamente a las comunidades bentónicas y la estabilidad del ecosistema.
	Alteración del lecho marino	Biótico	Fauna y flora marinas	
Transporte de materiales al sitio	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Las emisiones de gases de combustión provenientes de las embarcaciones utilizadas en el proyecto pueden afectar la calidad del aire.
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	Durante la construcción, aumenta el número de embarcaciones de construcción que transitan entre la costa y el sitio del proyecto offshore. Este aumento del tráfico marino podría llegar a afectar a otros sectores productivos.
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	Las actividades de transporte de materiales pueden generar aumento de los niveles de presión sonora debido al uso de maquinaria y embarcaciones.
	Posible presión sobre los Recursos Naturales por el Uso de materiales de construcción	Físico	Recursos naturales	El uso de materiales de construcción necesarios para el proyecto, como concreto, acero, aditivos, agua y electricidad, puede ejercer presión sobre los recursos naturales.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión	Biótico	Fauna marina	La actividad elevada de las embarcaciones puede aumentar los riesgos de colisión para algunas especies marinas (por ejemplo, ballenas).
	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	Las actividades de transporte pueden afectar los hábitats marinos debido al movimiento continuo de materiales y equipos.
	Alteración de Fauna Marina	Biótico	Fauna marina	Además, pueden causar perturbaciones en la fauna marina, afectando su comportamiento y hábitats.
	Alteración del paisaje	Antrópico	Paisaje	El aumento de flujo de embarcaciones puede afectar el paisaje de las zonas costeras, alterando su apariencia visual y valor escénico.
Instalación de fundaciones				
Monopilotes / Jackets / Base gravedad y succión / Flotante	Alteración de Fauna Marina	Biótico	Fauna marina	Monopilote y Trípode: Durante la instalación, el ruido y las vibraciones generados por el martillo hidráulico pueden causar perturbaciones. Base de Gravedad: La construcción y el transporte de la base de gravedad pueden provocar perturbaciones en el entorno marino Jackets: Durante la construcción y la instalación, los ruidos y las actividades pueden causar alteraciones en el hábitat de la fauna marina en el área circundante. Cubeta de succión: El proceso de instalación no implica la construcción de pilotes, lo que minimiza las perturbaciones a la fauna marina durante la construcción. Flotantes: La presencia y movimiento de la estructura flotante pueden alterar la distribución y comportamiento de la fauna marina en la zona.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Alteración del lecho marino	Biótico	Fauna y flora marinas	La instalación de fundaciones implica el disturbio del lecho marino, ya sea mediante la excavación, el anclaje de pilotes o la colocación de estructuras. Estos procesos pueden alterar la composición del sustrato marino, afectar a los organismos bentónicos y modificar los hábitats bentónicos y pelágicos, lo que a su vez puede tener consecuencias negativas en la biodiversidad y el equilibrio ecológico de la zona. Las tecnologías flotantes pueden tener menor impacto; sin embargo, los anclajes pueden afectar el lecho marino al penetrar en el suelo y modificar el entorno durante la instalación y operación.
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	Monopilote y Trípode: El martilleo hidráulico utilizado para la instalación puede generar ruidos y vibraciones Base de gravedad: Durante la construcción y el transporte de la base, pueden generarse ruidos y perturbaciones en el entorno marino. Cubeta de succión: El proceso de instalación minimiza la generación de ruidos y perturbaciones durante el proceso. Flotante: El proceso de instalación genera ruidos y perturbaciones. Estos ruidos pueden causar estrés, desorientación y molestias en la fauna marina, interferir en la comunicación y la detección de presas, y afectar negativamente a especies sensibles al sonido, como cetáceos, tortugas marinas y peces.
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Las emisiones atmosféricas de gases y partículas pueden resultar del uso de maquinaria diésel, equipos de soldadura y materiales de construcción durante la instalación de las fundaciones.
	Afectación de la calidad del agua	Físico	Calidad del agua	Durante la instalación de fundaciones, pueden ocurrir derrames de combustible, aceites lubricantes y otros productos químicos, así como la liberación de sedimentos al agua debido a la excavación y la remoción del lecho marino.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	La instalación de fundaciones puede contribuir a la destrucción o modificación de hábitats marinos, afectando la biodiversidad y el equilibrio ecológico de la zona.
	Pérdida de biodiversidad	Biótico	Fauna y flora marinas	La desaparición de especies y la disminución de su abundancia debido a la pérdida de hábitat pueden tener efectos negativos en la estabilidad y la resiliencia del ecosistema marino
	Posible presión sobre los Recursos Naturales por el Uso de materiales de construcción	Físico	Recursos naturales	La construcción del proyecto requiere materiales como concreto, acero, aditivos, agua y electricidad, ejerciendo presión sobre los recursos naturales disponibles.
	Congestión de servicios logísticos	Antrópico	Tráfico	Puede ocurrir una intensificación del tráfico vehicular, especialmente en las áreas portuarias y de almacenamiento de materiales. El traslado de equipos y materiales desde los puertos hasta los sitios de construcción. Además, puede ocurrir una congestión de los servicios logísticos por la disponibilidad de espacio en los puertos y áreas de almacenamiento, lo que puede interferir con otras actividades industriales.
	Aumento de Tráfico carretero	Antrópico	Tráfico	
Instalación de torres y aerogeneradores	Alteración de Fauna Marina	Biótico	Fauna marina	La operación de equipos de construcción, como grúas y plataformas flotantes, puede causar disturbios acústicos que alteran el comportamiento y la migración de especies marinas.
	Generación de residuos sólidos	Físico	Calidad del agua	Durante la construcción se generan residuos de embalaje, desechos de construcción y otros materiales descartados que pueden contaminar el ambiente marino si no se manejan adecuadamente.
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	El aumento del tráfico marítimo debido al transporte de equipos, componentes y personal hacia y desde el sitio de construcción puede

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
				incrementar el riesgo de colisiones entre embarcaciones y afectar otros sectores productivos.
	Cambios en la hidrodinámica	Físico	Lecho marino	La presencia de estructuras submarinas y embarcaciones de construcción puede afectar la morfología del lecho marino y la distribución de sedimentos, lo que potencialmente altera los ecosistemas marinos locales y la biodiversidad.
	Alteración del paisaje	Antrópico	Paisaje	El paisaje marino y costero puede ser temporalmente afectado por la presencia de embarcaciones de construcción, grúas y otros equipos utilizados en el proceso de montaje.
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Las emisiones de escape de los barcos y la operación de equipos de construcción pueden contribuir a la contaminación del aire en las áreas del proyecto.
	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	El uso de equipos pesados y la presencia de embarcaciones de construcción pueden causar disturbios en el lecho marino, afectando a los organismos bentónicos y a las comunidades de peces que dependen de estas áreas para alimentarse, refugiarse y reproducirse.
	Mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión	Biótico	Fauna marina	Existe un riesgo de colisión entre embarcaciones de construcción y especies marinas, como mamíferos y tortugas marinas, durante las actividades de instalación.
	Mortalidad o lesiones de aves por colisión	Biótico	Aves	Las grúas y palas de los aerogeneradores pueden representar un riesgo de colisión para las aves, especialmente durante las operaciones de transporte y montaje.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Alteración del suelo onshore	Físico	Suelo	La construcción de infraestructuras terrestres, como carreteras de acceso y áreas de almacenamiento, puede provocar la compactación del suelo, la pérdida de hábitats naturales y la erosión del terreno.
	Afectación de la flora y fauna onshore	Biótico	Fauna y flora terrestre	La pérdida o alteración de hábitats naturales, la contaminación del aire y del agua, y el aumento del tráfico vehicular pueden tener impactos negativos en las poblaciones de animales y plantas terrestres.
	Posible presión sobre los Recursos Naturales por el Uso de materiales de construcción	Físico	Recursos naturales	La logística y las actividades industriales pueden requerir grandes cantidades de recursos naturales, como combustibles fósiles, agua y materias primas.
	Aumento de Tráfico carretero	Antrópico	Tráfico	Las operaciones logísticas pueden aumentar el tráfico de vehículos comerciales en carreteras y áreas urbanas, lo que puede provocar congestión del tráfico, retrasos en los desplazamientos y mayor riesgo de accidentes
	Congestión de servicios logísticos	Antrópico	Navegación	Aumento del tráfico marítimo por el traslado de los componentes de los aerogeneradores desde los puertos de suministro hasta los sitios de instalación, lo que puede causar interferencias con otras actividades marítimas y aumentar el riesgo de accidentes en tierra.
	Afectación de las actividades pesqueras	Antrópico	Pesca	Las actividades de construcción y el aumento del tráfico marítimo pueden interferir con las actividades pesqueras en la zona. La presencia de embarcaciones de construcción y las restricciones de acceso a ciertas áreas pueden dificultar el trabajo de los pescadores, afectando sus medios de vida y sus ingresos

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
Instalación de cables submarinos	Alteración del lecho marino	Biótico	Fauna y flora marinas	La instalación de cables submarinos implica la creación de zanjas o depósitos en el lecho marino para alojar los cables, lo que puede alterar la composición y la estructura del sustrato marino.
	Alteración de Fauna Marina	Biótico	Fauna marina	La instalación de cables submarinos puede aumentar la cantidad de sedimentos y productos químicos en el agua, afectando la calidad del agua y, por ende, la fauna marina.
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	El ruido y la vibración generados durante la instalación de los cables pueden perturbar a la vida marina, incluidos los mamíferos marinos, los peces y los invertebrados.
	Perturbación por Vibraciones	Físico	Niveles de presión sonora	Las actividades de instalación de los cables pueden generar vibraciones en el lecho marino debido al uso de equipos de perforación, excavación o colocación de cables. Estas vibraciones pueden afectar a la fauna marina sensible, como los organismos que viven en el sustrato marino o aquellos que son sensibles a cambios en el entorno acústico.
	Generación de residuos sólidos	Físico	Lecho marino	Durante la instalación de los cables submarinos, se puede generar residuos, como materiales de embalaje y equipo, que pueden terminar en el lecho marino
	Afectación de la calidad del agua	Físico	Calidad del agua	Durante la instalación de los cables submarinos se puede generar vertidos de sedimentos, productos químicos o materiales de construcción que afecten la calidad del agua
	Mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión	Biótico	Fauna marina	Durante la instalación de los cables submarinos existe el riesgo de colisión con especies marinas, como ballenas, tortugas marinas y peces

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	El aumento en el tráfico marino debido a la presencia de buques cableros, embarcaciones de apoyo y otras embarcaciones involucradas en el proceso puede generar conflictos con el tráfico marítimo existente.
	Riesgo para la navegación	Antrópico	Navegación	La presencia de cables submarinos puede representar un riesgo para la seguridad de la navegación, especialmente para embarcaciones pequeñas y pesqueras
	Afectación de las actividades pesqueras	Antrópico	Pesca	Las actividades de instalación de los cables pueden interferir con las actividades pesqueras al obstruir las áreas de pesca o dañar el equipo de pesca.
Instalación de infraestructura de conexión / subestación	Alteración del lecho marino	Biótico	Fauna y flora marinas	El proceso de instalación de estructuras pesadas como los jackets y módulos puede causar una alteración significativa del lecho marino, especialmente en áreas con suelos más blandos o menos estables.
	Alteración de Fauna Marina	Biótico	Fauna marina	La fauna marina puede verse afectada debido al ruido, las vibraciones y la actividad de las embarcaciones durante la instalación.
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	La instalación de jackets y módulos requerirá un aumento en el tráfico marítimo para el transporte de estas grandes estructuras desde el puerto de origen hasta el sitio de instalación. Este aumento en el tráfico puede aumentar el riesgo de colisiones
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	El ruido y la vibración generados durante la instalación de los cables pueden perturbar a la vida marina, incluidos los mamíferos marinos, los peces y los invertebrados.
	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	La instalación de estructuras pesadas puede alterar los hábitats marinos y provocar la pérdida o degradación de áreas importantes para la reproducción, alimentación o refugio de especies marina

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión	Biótico	Fauna marina	La presencia de grandes estructuras marinas durante la fase de construcción puede aumentar el riesgo de colisiones
	Cambios en la hidrodinámica	Físico	Lecho marino	La instalación de estructuras pesadas como los jackets y módulos puede alterar la dinámica del agua en el área circundante.
	Mortalidad o lesiones de aves por colisión	Biótico	Aves	Las actividades de construcción en el área marina pueden perturbar a las aves marinas que utilizan el entorno marino como hábitat o para alimentarse, aumentando el riesgo de colisiones.
	Generación de residuos sólidos	Físico	Calidad del agua	Las actividades de construcción pueden generar desechos de construcción, embalajes y materiales que pueden contaminar el entorno marino si no se gestionan adecuadamente.
	Afectación de la calidad del agua	Físico	Calidad del agua	Las actividades de construcción pueden generar vertidos de contaminantes como aceites, lubricantes u otros productos químicos utilizados en el proceso de construcción, afectando la calidad del agua.
Planta de electrólisis PEM onshore				
Preparación del terreno para la instalación de la planta	Alteración del suelo onshore	Físico	Suelo	Durante la preparación del terreno, y cuando la planta de electrólisis se encuentra onshore, se pueden llevar a cabo actividades como excavaciones y movimientos de tierra, lo que puede causar una alteración significativa del suelo.
	Alteración de hábitats terrestres	Biótico	Fauna terrestre	La preparación del terreno puede implicar la destrucción o fragmentación de hábitats naturales, afectando la biodiversidad y la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios ambientales.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Afectación de la capa vegetal	Físico	Suelo	Las actividades de acondicionamiento del terreno pueden requerir la remoción de la capa vegetal, afectando la estructura del suelo y la flora local.
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Durante la preparación del terreno, las emisiones de polvo y contaminantes atmosféricos pueden aumentar debido a la actividad de maquinaria pesada y el transporte de materiales.
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	Las actividades de preparación del terreno, como el uso de maquinaria y equipos, pueden generar un aumento en los niveles de presión sonora, afectando el entorno acústico.
	Afectación de la flora y fauna onshore	Biótico	Fauna y flora marinas	La alteración de hábitats terrestres y la remoción de la capa vegetal pueden afectar a la fauna local al reducir su hábitat y disponibilidad de recursos alimenticios.
	Perturbación de aves costeras	Biótico	Aves	
	Aumento de Tráfico carretero	Antrópico	Tráfico	Durante la preparación del terreno, puede haber un aumento en el tráfico de vehículos debido al transporte de materiales y equipos, incrementando la congestión vial.
Construcción de la infraestructura civil (edificaciones, accesos, etc.).	Alteración del paisaje	Antrópico	Paisaje	La construcción de infraestructuras civiles puede modificar la apariencia visual del entorno costero, afectando la estética del paisaje y el valor escénico del área.
	Afectación de la calidad del agua	Físico	Calidad del agua	Las actividades de construcción pueden generar escorrentía superficial y aumentar el riesgo de contaminación de cuerpos de agua cercanos debido al lavado de materiales de construcción y la descarga de aguas residuales.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	Las actividades de construcción pueden generar un aumento en los niveles de ruido, afectando el entorno acústico y la fauna local.
	Generación de residuos sólidos	Físico	Calidad del agua	Durante la construcción de generarán grandes cantidades de residuos, incluyendo materiales de construcción no utilizados, empaques y desechos de demolición.
	Posible presión sobre los Recursos Naturales por el Uso de materiales de construcción	Físico	Recursos naturales	La construcción de infraestructuras civiles requiere una cantidad significativa de recursos naturales, como concreto, acero, agua y energía, ejerciendo presión sobre estos recursos.
Instalación de equipos y sistemas de la planta, incluyendo electrolizadores, compresores, sistemas de almacenamiento, etc.	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	Durante la instalación de equipos se utilizan maquinaria, grúas y equipos que pueden generar ruidos y vibraciones.
	Generación de residuos sólidos	Físico	Calidad del agua	La instalación de equipos puede generar residuos sólidos, líquidos o gaseosos, como materiales de embalaje, productos químicos o desechos de construcción, que deben ser gestionados adecuadamente.
	Posible presión sobre los Recursos Naturales por el Uso de materiales de construcción	Físico	Recursos naturales	La instalación de equipos requiere recursos naturales como agua, energía y materiales de construcción, ejerciendo presión sobre estos recursos.
	Aumento de Tráfico carretero	Antrópico	Tráfico	Las actividades de instalación de equipos pueden producir aumento del tráfico de vehículos durante el transporte de materiales y equipos.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Las actividades de instalación de equipos pueden producir un aumento de las emisiones de gases como monóxido y dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno o partículas en suspensión debido al uso de maquinaria y equipos.
	Alteración del paisaje	Antrópico	Paisaje	La instalación de equipos puede producir una modificación de la apariencia visual del entorno costero, afectando la estética del paisaje y el valor escénico del área.
	Afectación de la flora y fauna onshore	Biótico	Fauna y flora marinas	La presencia de maquinaria pesada, el movimiento de vehículos, el ruido y la vibración asociados con la instalación de equipos pueden perturbar a la fauna terrestre local.
	Perturbación de aves costeras	Biótico	Aves	Si la planta se encuentra cerca de zonas costeras, la instalación de equipos y sistemas podría perturbar a las aves costeras que utilizan la zona para alimentarse, descansar o reproducirse. El ruido, las luces y la actividad humana pueden afectar a estas aves, provocando cambios en sus patrones de comportamiento y migración
Planta de electrólisis PEM offshore:				
Instalación de plataformas o estructuras flotantes para soportar la planta.	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	La instalación de plataformas o estructuras flotantes puede implicar la alteración o destrucción de hábitats marinos, afectando la biodiversidad y el equilibrio ecológico de la zona.
	Alteración del lecho marino	Biótico	Fauna y flora marinas	La colocación de las plataformas puede provocar cambios en la composición y estabilidad del lecho marino, lo que afecta a los organismos que habitan en el fondo marino.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	Las actividades de construcción y anclaje de fundaciones en el lecho marino pueden generar ruidos y vibraciones que afectan a la fauna marina.
	Afectación de la calidad del agua	Físico	Calidad del agua	La presencia de contaminantes en el agua, como aceites, combustibles o productos químicos por derrames durante la instalación de las plataformas, puede afectar la calidad del agua.
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	El aumento del tráfico marítimo debido a la instalación de plataformas y estructuras flotantes puede incrementar el riesgo de colisiones, perturbaciones acústicas y trastornos en la navegación de otras embarcaciones en la zona.
	Alteración del paisaje	Antrópico	Paisaje	La presencia de estructuras flotantes puede alterar la apariencia visual de la zona marina, especialmente en áreas cercanas a la costa
	Afectación de las actividades pesqueras	Antrópico	Pesca	Las estructuras flotantes pueden interferir con las actividades pesqueras en la zona, dificultando el trabajo de los pescadores y afectando sus medios de vida.
	Riesgo para la navegación	Antrópico	Navegación	Las estructuras flotantes pueden representar un riesgo para la navegación marítima, especialmente si no se señalizan adecuadamente o se ubican en áreas de tráfico marítimo intenso.
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Las operaciones asociadas a la instalación de plataformas pueden generar emisiones de contaminantes atmosféricos, como gases de escape de los barcos, generadores auxiliares o maquinaria utilizada en la instalación.
	Congestión de servicios logísticos	Antrópico	Navegación	La instalación de plataformas puede generar congestión de servicios logísticos en los puertos de carga y descarga, así como en las rutas marítimas utilizadas para el transporte de materiales y equipos.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
Instalación de planta de electrólisis y equipos auxiliares como desalinización, compresión, otros	Mortalidad o lesiones de aves por colisión	Biótico	Aves	Durante la instalación de equipos y sistemas en el mar, las actividades pueden perturbar las poblaciones de aves marinas que utilizan el área para alimentarse, descansar o reproducirse.
	Alteración del lecho marino	Biótico	Fauna y flora marinas	La colocación de las plataformas puede provocar cambios en la composición y estabilidad del lecho marino, lo que afecta a los organismos que habitan en él y a los procesos biogeoquímicos del fondo marino.
	Generación de residuos sólidos	Físico	Calidad del agua	La instalación de equipos puede generar residuos sólidos, líquidos o gaseosos, como materiales de embalaje, productos químicos o desechos de construcción.
	Congestión de servicios logísticos	Antrópico	Tráfico	Las actividades de instalación de equipos pueden generar congestión de servicios logísticos en los puertos de carga y descarga, así como en las rutas marítimas utilizadas para el transporte de materiales y equipos, aumentando el riesgo de accidentes y colisiones en el mar.
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	Las actividades de instalación de equipos pueden aumentar el tráfico marítimo en la zona, incrementando los riesgos de colisiones.
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	Las actividades de instalación de equipos, como el uso de maquinaria pesada, herramientas de construcción y equipos, pueden generar un aumento en los niveles de ruido, perturbando a la fauna marina y el entorno en general.
	Afectación de las actividades pesqueras	Antrópico	Pesca	La instalación de equipos puede interferir con las actividades pesqueras locales, dificultando el trabajo de los pescadores y afectando sus medios de vida.
Conexión a la red eléctrica y	Alteración del lecho marino	Biótico	Fauna y flora marinas	La instalación de cables submarinos puede provocar la alteración del lecho marino durante el proceso de tendido y enterrado

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
de agua, posiblemente mediante cables submarinos.	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	La instalación de cables submarinos implica el uso de equipos especializados, como buques cableros y vehículos operados a distancia (ROV), que pueden generar ruidos submarinos y perturbaciones en el entorno marino.
	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	Los equipos de instalación y operaciones de tendido de cables submarinos pueden perturbar la fauna marina que habita en la zona.
	Generación de residuos sólidos	Físico	Lecho marino	La instalación de cables submarinos puede generar desechos de materiales de construcción, restos de cables y equipos, así como sedimentos y materiales excavados del lecho marino.
	Afectación de la calidad del agua	Físico	Calidad del agua	Durante la instalación de los cables submarinos, la suspensión de sedimentos y la liberación de materiales contaminantes pueden afectar la calidad del agua.
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	El aumento del tráfico marítimo debido a la presencia de buques cableros y otras embarcaciones involucradas en el proceso de instalación de cables submarinos puede generar conflictos con el tráfico marítimo existente.
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Las operaciones asociadas a la instalación de cables submarinos, como el transporte marítimo de equipos y materiales, pueden contribuir a la emisión de contaminantes atmosféricos

Los impactos ambientales más relevantes detectados para esta fase se muestran en la Figura 31, destacando los relacionados con la alteración de los ecosistemas marinos por el aumento de los niveles de ruido submarino, la afectación de la calidad del aire, principalmente por las emisiones directas de las embarcaciones, maquinarias y equipos, la afectación de la calidad del agua, la generación de residuos, y los riesgos para la fauna marina y terrestre.

En la preparación del sitio base, dragado, construcción de fundaciones, y la instalación de cables submarinos, se destacan la alteración del lecho marino, la generación de residuos, y la congestión de servicios logísticos. En la instalación de plantas de electrólisis PEM onshore, se añaden la afectación de la flora y fauna terrestre (en el caso de que se elija la opción de instalación en tierra), y la interferencia con actividades pesqueras cuando se elige la opción de instalar la planta offshore.

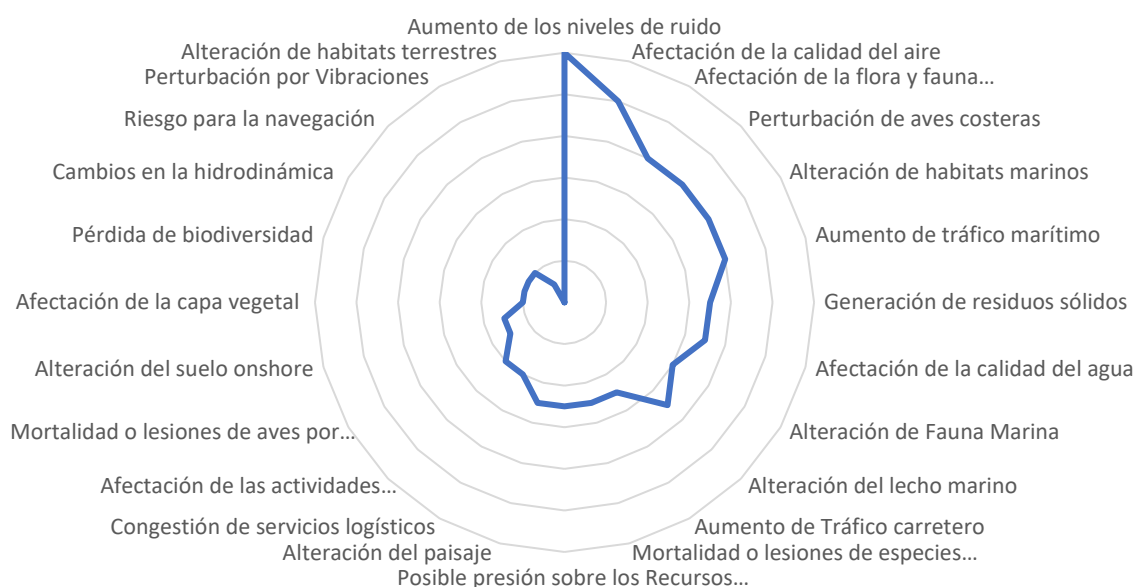


Figura 31. Principales impactos ambientales identificados en la Fase de Construcción.

Dentro de las actividades identificadas para la fase de construcción, la que tiene un mayor impacto y afectación es la construcción de fundaciones para las torres eólicas. Esta actividad implica la introducción de estructuras en el lecho marino, lo cual puede causar perturbaciones significativas en el hábitat marino, especialmente en el sustrato y la biota asociada. Puede ocasionar un aumento considerable del nivel de ruido submarino, cambios en la turbidez del agua y la liberación de sedimentos, todos los cuales pueden afectar a la calidad del hábitat marino (Fatemeh Rezaei, 2023).

Dentro de los impactos más significativos que ocurren en la fase de hincado de pilotes, Ibon et al. (2022, pág. 3) mencionan que se ha evidenciado la afectación de los mamíferos marinos, induciendo comportamientos de evitación y disminuyendo temporalmente su presencia en el área de construcción. Específicamente, las actividades de pilotaje pueden tener un impacto considerable en la abundancia y

distribución de mamíferos como cetáceos y delfines, que pueden abandonar temporalmente el área de construcción. Además, también destacan como la alteración de hábitats benthicos, se puede ver afectada durante actividades como el anclaje y la instalación de estructuras, modificando el lecho marino y afectando la biodiversidad local. Esto incluye cambios en la disponibilidad de alimentos para niveles tróficos superiores, lo que a su vez puede alterar sus poblaciones, alterando las dinámicas ecológicas de la zona.

Los materiales utilizados en los cables también son una consideración importante, tal como se explicó en la sección 4.6, en caso de daño o desgaste, podrían liberar sustancias nocivas en el ambiente marino. Además, la construcción y mantenimiento de estas infraestructuras requieren operaciones logísticas significativas que pueden tener impactos ambientales adicionales, como afectación de la calidad del aire por emisiones de gases de contaminantes, entre otros.

Por otro lado, en la instalación de plantas de electrólisis PEM offshore y la instalación de cables submarinos, se resaltan la alteración de hábitats marinos, aumento de turbidez y sedimentos resuspendidos, la generación de residuos, y los riesgos para la navegación y la fauna marina. Estos resultados están en línea con los resultados presentados en los estudios detallados a partir de la sección 7.

Un impacto ambiental que vale la pena destacar en esta fase, y puede tener un alcance más bien global, es el de posible presión sobre los recursos naturales, específicamente por el alto consumo de acero y hormigón. Condon (2023, pág. 38) destaca que el consumo intensivo de materiales, especialmente el concreto y acero, tienen un impacto ambiental considerable debido a las emisiones generadas durante su producción. La producción de acero y concreto son responsables de una parte sustancial de las emisiones de gases de efecto invernadero del proyecto. Además, se resalta el uso de otros materiales como cobre, platino, titanio, aluminio, acero inoxidable, entre otros, que son fundamentales para la fabricación de las membranas del electrolizador.

También se destacan otros impactos ambientales relevantes, estos incluyen el aumento del tráfico carretero y marítimo asociados al transporte de materiales, la perturbación de aves costeras y marinas, la alteración del paisaje, la congestión de servicios logísticos, y la interferencia con actividades pesqueras. Estos impactos pueden tener efectos significativos en la calidad de vida de las comunidades locales, la seguridad de la navegación, y la integridad de los ecosistemas costeros y marinos.

En relación con el medio y factor ambiental más afectado, se destaca una mayor afectación al medio Físico, y con un valor bastante cercano al medio Biótico, tal como se muestra en la Figura 32; sin embargo, se destaca que el medio Antrópico también tiene una presencia relevante. En el medio físico, se identificaron impactos con la mayor frecuencia de incidencias en los niveles de presión sonora y la calidad del agua, esto está acorde con los resultados presentados en la literatura consultada en la sección 7. También se observan efectos en la calidad del aire, el lecho marino y el suelo.

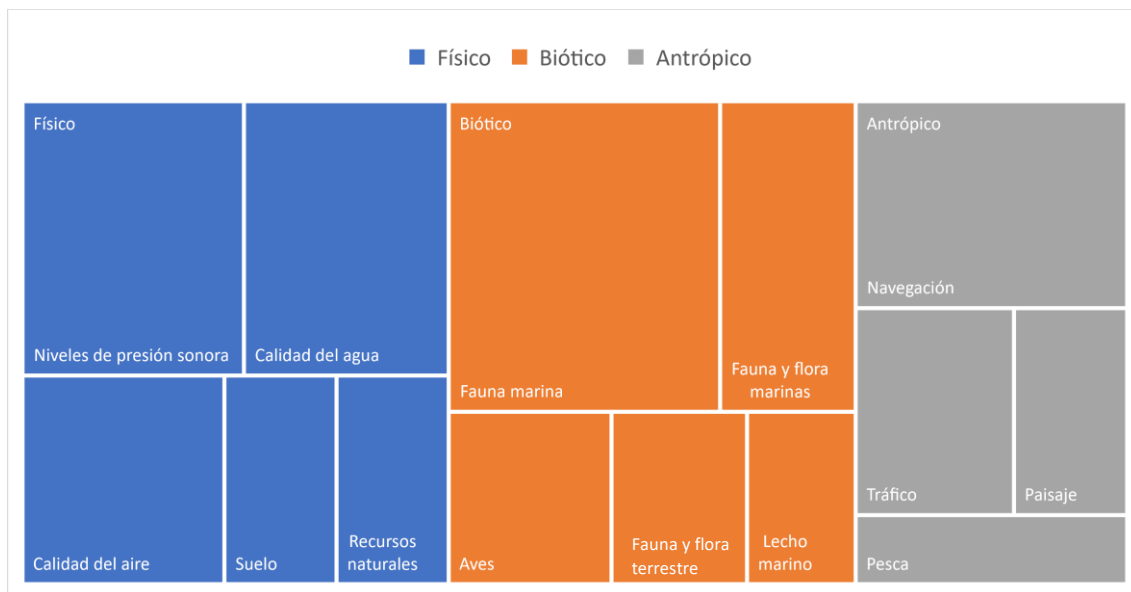


Figura 32. Principales factores ambientales afectados en la etapa de construcción

El medio biótico muestra una alta frecuencia de impactos sobre la fauna y flora marina, seguida por la fauna terrestre y las aves. La afectación de la fauna y flora terrestre ocurriría principalmente cuando la configuración de la planta de electrólisis se ubique onshore, así como también relacionada a las actividades portuarias que sean necesarias.

En el medio antrópico, los impactos se distribuyen entre la pesca, el tráfico (marítimo y terrestre), la navegación, los recursos naturales y el paisaje. Aunque la frecuencia de impactos en este medio es relativamente menor, es importante considerar y evaluar cómo las actividades de construcción pueden afectar las actividades humanas y el uso de los recursos naturales en la zona. Un posible impacto de gran relevancia será la selección adecuada del sitio base para la infraestructura portuaria, ya que esto podría ocasionar impactos visuales o restricciones al acceso público a las playas, afecto la cotidianidad de la población. Es importante mencionar, que un impacto ambiental positivo que no se incluyó dentro de la evaluación, pero es uno que impacta todas las actividades relacionadas con la construcción, es el de generación de empleo y creación de una nueva economía alrededor de la industria offshore, lo que puede tener un impacto significativo en las comunidades locales.

Durante la construcción, se requieren distintos roles, desde ingenieros y técnicos especializados en energía eólica y plantas químicas, hasta trabajadores de la construcción, operadores de grúa, de buques, equipos, personal de seguridad, personal de servicios, entre otros. Esto no solo crea nuevos empleos directos, sino que también puede estimular el crecimiento de empleos indirectos en sectores como los servicios, logística y hospitalidad, debido al aumento en la demanda de bienes y servicios locales. El aumento en el empleo generalmente contribuye a un mejoramiento económico en las comunidades cercanas, con más personas trabajando y gastando en la economía local.

8.3. Fase de Operación

Durante la fase de operación, se pueden identificar los impactos y factores ambientales que se detallan en la Tabla 17.

Tabla 17. Actividades que pueden ocurrir en fase de operación del proyecto con sus impactos y factores ambientales relevantes

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
Parque eólico Offshore:				
Generación de electricidad	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	El ruido producido por el funcionamiento de los aerogeneradores puede tener efectos en la fauna marina cercana, especialmente en especies sensibles al sonido
	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	El ruido y las vibraciones generados por los aerogeneradores pueden afectar a peces y mamíferos marinos.
	Mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión	Biótico	Fauna marina	Pueden ocurrir colisiones entre especies marinas y las estructuras de los aerogeneradores resultando en lesiones o mortalidad.
	Mortalidad o lesiones de aves por colisión	Biótico	Aves	Los aerogeneradores pueden representar un riesgo de colisión para las aves, especialmente para las especies migratorias.
	Perturbación por Vibraciones	Físico	Niveles de presión sonora	Las vibraciones generadas por la operación de los aerogeneradores pueden afectar a la fauna marina, especialmente a especies sensibles a los cambios en la presión sonora.
	Afectación por Campos electromagnéticos	Físico	Temperatura del agua	Los campos electromagnéticos generados por los cables de los aerogeneradores pueden tener un efecto de aumento de temperatura del agua.
	Creación de nuevo ecosistema	Biótico	Fauna y flora marinas	A largo plazo, las estructuras pueden actuar como arrecifes artificiales, modificando las comunidades biológicas locales. Esto podría resultar en un impacto positivo a largo plazo, aunque también se debe considerar que podría implicar un cambio en el ecosistema.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Alteración del paisaje	Antrópico	Paisaje	Dependiendo de la distancia de los parques a la costa, podría tener un impacto visual para las comunidades costeras y el turismo, afectando el valor estético y recreativo de la zona.
	Afectación de las actividades pesqueras	Antrópico	Pesca	La ubicación de los parques puede interferir con las rutas de navegación tradicionales y las áreas de pesca, afectando estas actividades económicas.
Transmisión de electricidad hasta Subestaciones	Aumento de temperatura	Físico	Temperatura del agua	Los cables eléctricos disipan calor durante su funcionamiento, lo cual puede alterar las condiciones térmicas locales del agua.
	Afectación de la calidad del agua	Físico	Calidad del agua	Durante la operación puede existir el riesgo de daño físico a los cables por anclas o durante actividades pesqueras, lo que podría resultar en cortocircuitos o incluso en la exposición de materiales potencialmente contaminantes, que a su vez pueden sufrir procesos de corrosión y liberar metales pesados u otras sustancias tóxicas al agua.
	Afectación por Campos electromagnéticos	Físico	Temperatura del agua	Los campos electromagnéticos generados por el flujo de corriente en los cables pueden aumentar la temperatura del agua y afectar a las especies marinas.
	Mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión	Biótico	Fauna marina	Podrían ocurrir incidentes de enredo y mordeduras en cables submarinos no enterrados. Además, la fauna marina puede verse afectada por el campo eléctrico emitido por los cables.
	Alteración del paisaje	Antrópico	Paisaje	En los puntos donde los cables llegan a tierra, puede haber impactos visuales o restricciones al acceso público a las playas por medidas de seguridad, esto puede ocasionar un impacto a la población.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Creación de nuevo ecosistema	Biótico	Fauna y flora marinas	Al igual que otras estructuras marinas, los cables submarinos pueden actuar como arrecifes artificiales, facilitando la colonización por parte de diversas especies marinas
	Afectación de las actividades pesqueras	Antrópico	Pesca	Los cables submarinos pueden representar un riesgo para las actividades pesqueras, especialmente las que involucran arrastre de fondo, y para la navegación si no están suficientemente enterrados o señalizados.
Mantenimiento planificado y no planificado	Alteración de Fauna Marina	Biótico	Fauna marina	El aumento del tráfico de embarcaciones de mantenimiento y las perturbaciones en el entorno pueden afectar a la fauna marina, alterando sus patrones de comportamiento y migración.
	Generación de residuos sólidos	Físico	Calidad del agua	Se pueden generar residuos como lubricantes y desechos operacionales, que deben ser gestionados adecuadamente para evitar la contaminación del agua.
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	Debido a embarcaciones de mantenimiento; puede llevar a un mayor riesgo de colisión con fauna marina y afectar las rutas de navegación.
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Las emisiones de los barcos de servicio pueden contribuir a la contaminación del aire en las áreas circundantes.
	Mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión	Biótico	Fauna marina	Durante la fase operativa podrían ocurrir colisiones con las embarcaciones y equipos de mantenimiento, resultando en lesiones o mortalidad de especies marinas.
	Congestión de servicios logísticos	Antrópico	Tráfico	Los parques eólicos offshore dependen en gran medida de los puertos para operaciones de mantenimiento y para el almacenamiento temporal de equipos. Esto puede llevar a una sobrecarga de las capacidades portuarias existentes, afectando no solo las operaciones relacionadas con el parque eólico, sino

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
				también otras actividades comerciales e industriales en el puerto
	Afectación de las actividades pesqueras	Antrópico	Pesca	Las zonas ocupadas por el proyecto pueden limitar áreas de pesca, y potencialmente afectar los ingresos de los pescadores
Planta de electrólisis PEM:				
Operación continua de los electrolizadores	Posible presión sobre los Recursos Naturales por el consumo de agua	Físico	Calidad del agua	Podrían producirse presiones sobre los recursos hídricos, ya que los electrolizadores PEM necesitan agua altamente purificada para funcionar eficientemente.
	Alteración de las costas	Antrópico	Paisaje	Si la planta de producción de H ₂ se ubica onshore, ocurrirá una afectación de las costas que normalmente podrían ser utilizadas para recreación y turismo, se destinan a sitios industriales.
	Emisiones de O ₂	Físico	Calidad del aire	La emisión de oxígeno en altas concentraciones puede presentar riesgos de seguridad, como incendios o explosiones, requiriendo sistemas de ventilación adecuados.
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	El H ₂ es un potencial contribuyente al efecto invernadero. Científicos atmosféricos reconocen que las emisiones de H ₂ en la atmósfera tienen un impacto indirecto en el calentamiento global, principalmente porque una parte del H ₂ emitido es consumido por el radical hidroxilo (OH), que es el reactivo principal que elimina el gas de efecto invernadero metano de la atmósfera. Por lo tanto, los aumentos en las emisiones de H ₂ resultarán en disminuciones en las concentraciones promedio de OH en la atmósfera y un aumento en la vida útil atmosférica del metano (Shaddix, 2022, pág. 3)

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Aumento de temperatura	Físico	Temperatura del agua	Los electrolizadores PEM operan a temperaturas entre 20 °C y 80 °C pudiendo aumentar la temperatura media puntual del entorno.
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	La operación de equipos a alta presión puede generar niveles significativos de ruido, lo cual puede afectar tanto a la fauna local como a las comunidades cercanas
	Afectación por Campos electromagnéticos	Físico	Temperatura del agua	Los campos electromagnéticos generados por el flujo de corriente en los cables de alimentación pueden afectar la temperatura del agua y la fauna marina.
	Generación de residuos sólidos	Físico	Calidad del agua	Aunque los electrolizadores PEM no utilizan líquidos alcalinos o ácidos fuertes como en otras formas de electrólisis, la manipulación y disposición de cualquier sustancia química utilizada en el mantenimiento de los equipos debe ser manejada cuidadosamente.
	Creación de nuevo ecosistema	Biótico	Fauna y flora marinas	Al igual que en el parque eólico offshore, las estructuras (en agua) de las plantas de electrólisis pueden actuar como arrecifes artificiales, facilitando la colonización por parte de diversas especies marinas
	Riesgos de seguridad y fugas	Antrópico	Calidad del aire	El hidrógeno es altamente inflamable y, bajo ciertas condiciones, explosivo. Las fugas durante la compresión pueden representar riesgos significativos
	Perturbación por Vibraciones	Físico	Niveles de presión sonora	La operación de los equipos genera vibraciones que pueden afectar a la fauna marina y al entorno acústico.
Operación continua de	Posible presión sobre los Recursos Naturales por el consumo de agua	Físico	Calidad del agua	La planta desalinizadora consume grandes cantidades de agua para el proceso de desalinización, lo que puede afectar los recursos hídricos locales.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
planta de desalinización	Alteración del paisaje	Antrópico	Paisaje	Si la planta desaladora se ubica onshore, ocurrirá una afectación de las costas que normalmente podrían ser utilizadas para recreación y turismo, se destinan a sitios industriales y estaciones de bombeo.
	Contaminación de aguas subterráneas	Físico	Calidad del agua	Si la planta desalinizadora está ubicada onshore, puede haber tuberías que transportan el concentrado salino ubicadas bajo tierra y pueden extenderse por largas distancias, pasando por debajo de los acuíferos costeros y pudiendo afectarlos si ocurre una fuga.
	Alteración de hábitats marinos	Biótico	Fauna marina	Durante la devolución de la salmuera concentrada al mar, por ser significativamente más densa que el agua de mar normal, tiende a hundirse hacia las capas inferiores del océano. Este proceso puede alterar significativamente las condiciones ambientales locales, afectando potencialmente a los hábitats marinos y a los organismos que residen en el fondo marino, especialmente por cambios en la salinidad y la oxigenación del agua.
	Afectación de la calidad del agua	Físico	Calidad del agua	La disposición de la salmuera en aguas marinas implica también la introducción de químicos no tratados que pueden ser perjudiciales para la vida marina. Estos químicos pueden incluir residuos de los procesos de limpieza de las membranas de ósmosis inversa y otros subproductos del proceso de desalinización que no son completamente eliminados durante el tratamiento del agua.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	El ruido es especialmente considerable cuando las instalaciones están ubicadas cerca de áreas residenciales. Las plantas desalinizadoras requieren el uso de bombas de alta presión y turbinas para su operación, las cuales son fuentes significativas de ruido. Ubicadas en plataformas offshore podrían tener menor efecto en el entorno, sin embargo; también podrían afectar el medio marino.
	Mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión	Biótico	Fauna marina	La posible afectación y captura involuntaria de especies marinas en el sistema de bombeo puede resultar en lesiones o mortalidad.
	Aumento de concentración de metales en el agua	Físico	Calidad del agua	El cobre que se utiliza frecuentemente en los sistemas de desalinización debido a sus propiedades anticorrosivas, especialmente en los intercambiadores de calor y otras partes metálicas, puede acumularse en el medio ambiente marino y convertirse en tóxico cuando se liberan cantidades biológicamente disponibles que exceden los niveles naturales.
	Creación de nuevo ecosistema	Biótico	Fauna y flora marinas	Las estructuras (en agua) de las plantas de desalinización pueden actuar como arrecifes artificiales, facilitando la colonización por parte de diversas especies marinas.
	Generación de residuos líquidos	Físico	Calidad del agua	Las áreas con alta actividad biológica generalmente requieren intensificar los procesos de pretratamiento, lo que resulta en un mayor uso de productos químicos que pueden presentarse en los procesos de descarga.
	Perturbación por Vibraciones	Físico	Niveles de presión sonora	La operación de los equipos de desalinización puede generar vibraciones, afectando a la fauna marina y al entorno acústico.

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
Sistema de compresión	Aumento de los niveles de ruido	Físico	Niveles de presión sonora	Los sistemas de compresión tienden a generar emisiones de ruido muy altas que pueden afectar al entorno.
	Perturbación por Vibraciones	Físico	Niveles de presión sonora	Los sistemas de compresión generan vibraciones que pueden afectar la fauna marina y el entorno acústico.
	Riesgos de seguridad y fugas	Antrópico	Calidad del aire	El hidrógeno es altamente inflamable y, bajo ciertas condiciones, explosivo. Las fugas durante la compresión pueden representar riesgos significativos
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	El H ₂ es un potencial contribuyente al efecto invernadero (Shaddix, 2022, pág. 3)
Almacenamiento de H ₂	Riesgos de seguridad y fugas	Antrópico	Calidad del aire	El hidrógeno es altamente inflamable y, bajo ciertas condiciones, explosivo. Las fugas durante la compresión pueden representar riesgos significativos
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	En el caso de que la planta este ubicada offshore, se requerirá la transferencia continua de H ₂ desde los tanques de almacenamiento hasta las embarcaciones de transporte, por lo que aumentará el tránsito de buques de carga
	Creación de nuevo ecosistema	Biótico	Fauna y flora marinas	Las estructuras de almacenamiento (en agua) pueden actuar como arrecifes artificiales, facilitando la colonización por parte de diversas especies marinas.
	Afectación de las actividades pesqueras	Antrópico	Pesca	Las zonas ocupadas por el proyecto pueden limitar áreas de pesca, y potencialmente afectando los ingresos de los pescadores

Actividad	Impacto ambiental	Medio	Factor Ambiental	Vinculación
Mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos.	Generación de residuos sólidos	Físico	Calidad del agua	Las membranas desgastadas o dañadas son residuos especiales que contienen metales preciosos como platino e iridio. Su disposición inadecuada puede resultar en la liberación de estos compuestos al ambiente. Se pueden generar residuos como lubricantes y desechos operacionales, desechos de embalajes entre otros.
	Alteración de Fauna Marina	Biótico	Fauna marina	El aumento de tráfico de embarcaciones y las perturbaciones en el entorno durante las actividades de mantenimiento pueden afectar a la fauna marina, alterando su comportamiento y desplazándolas de sus hábitats.
	Aumento de tráfico marítimo	Antrópico	Navegación	Las embarcaciones de mantenimiento pueden incrementar el tráfico marítimo, aumentando el riesgo de colisiones con la fauna marina y afectando las rutas de navegación.
	Afectación de la calidad del aire	Físico	Calidad del aire	Las emisiones de los barcos de servicio utilizados en las operaciones de mantenimiento pueden afectar la calidad del aire en las áreas circundantes.
	Mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión	Biótico	Fauna marina	Con las embarcaciones y equipos de mantenimiento, podrían ocurrir colisiones que afecten a las especies marinas.
	Afectación de las actividades pesqueras	Antrópico	Pesca	Las zonas ocupadas por el proyecto pueden limitar áreas de pesca, y potencialmente afectar los ingresos de los pescadores.

La etapa de operación de un parque eólico offshore conlleva una serie de actividades que se detallaron a partir en la sección 6 de este documento. Estas actividades están asociadas a impactos ambientales específicos, como se observa en la Figura 33, entre los que se destacan la posible mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión, el aumento de los niveles de ruidos, perturbaciones y vibraciones por la operación de los aerogeneradores, y el paso de embarcaciones de actividades de mantenimiento, pudiendo afectar a la fauna marina cercana, especialmente a las especies sensibles al sonido.

Se destaca entre uno de los impactos más relevantes el impacto de posible mortalidad o lesiones de aves, particularmente para las especies migratorias, que puedan colisionar con las palas de los aerogeneradores en operación. Además, también puede ocurrir mortalidad o lesiones por colisiones de especies marinas, tanto con las bases de los aerogeneradores, como con las embarcaciones que comenzaran a pasar con más frecuencia por la zona.

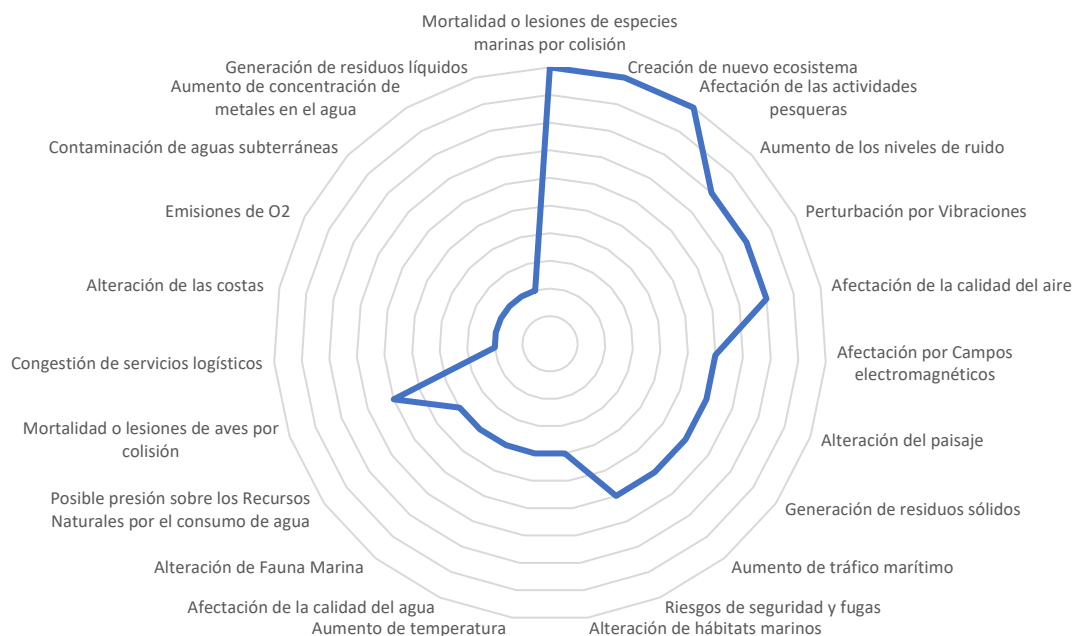


Figura 33. Principales impactos ambientales identificados en la Fase de Operación.

En cuanto a la transmisión de electricidad hasta las subestaciones, se generan efectos físicos como el aumento de temperatura debido a la disipación de calor de los cables eléctricos, lo cual puede alterar las condiciones térmicas del agua y afectar a las especies termosensibles. Los cables submarinos también pueden representar un riesgo para la navegación y las actividades pesqueras si no están suficientemente enterrados o señalizados. Además, se identifica un posible impacto en la contaminación del agua en el caso de roturas de los cables, pues como se mencionó en la sección 4.6, algunos conductores pueden estar cubiertos con un fluido aceitoso que, en el caso de roturas, puede filtrarse al lecho marino.

Se identificaron también posibles efectos de creación de campos electromagnéticos en los conductores, sin embargo, Bastien Taorminaa (2018, pág. 387) señala que estos efectos suelen ser bajos y aún no hay estudios suficientes para tener conclusiones sobre estos efectos en el entorno marino.

En las actividades de mantenimiento planificado y no planificado se generan alteraciones en la fauna marina debido al aumento del tráfico de embarcaciones y las perturbaciones en el entorno. Además, se pueden generar residuos, como lubricantes y desechos operacionales. Se destaca especialmente que en estas fases se debe coordinar muy bien la planificación de actividades, para evitar la congestión de servicios logísticos en los puertos utilizados para las operaciones de mantenimiento. Estos aspectos pueden limitar áreas de pesca y afectar los ingresos de los pescadores, así como tener repercusiones en otras actividades comerciales e industriales en los puertos.

En la fase de operación de la planta de electrólisis, los impactos ambientales más destacados están relacionados al consumo de recursos naturales, en especial el consumo de agua por parte de los electrolizadores para funcionar y para el proceso de desalinización.

La configuración en la que la planta de electrólisis se encuentra onshore, puede presentar mayores impactos que la configuración offshore, principalmente porque la ubicación en tierra tiene asociados impactos en la afectación de las costas, en las que puede provocar una alteración significativa, transformándolas en áreas industriales y modificación del paisaje costero. Además, la instalación de tuberías subterráneas que transporten aguas, en especial aguas con altas concentraciones de salmuera, pueden derivar en la contaminación de acuíferos costeros subterráneos (Gurudeo Anand Tularama, 2007).

Dentro de las actividades con mayor potencial de producir impactos ambientales durante la operación, está el proceso de desalinización, especialmente en los efluentes del proceso, ya que la devolución de la salmuera al mar puede alterar los hábitats marinos locales, impactando a las especies que residen en el fondo marino, debido a cambios en la salinidad y la oxigenación del agua (Mariam N. Soliman, 2021, pág. 601). Además, la disposición de la salmuera puede introducir químicos que afecten la calidad del agua y la vida marina.

Durante la compresión y almacenamiento, los mayores impactos ambientales están relacionados con la generación de niveles significativos de ruido, afectando tanto a la fauna local como a las comunidades cercanas, lo que subraya la importancia de implementar medidas de control del ruido para minimizar estos impactos. Además, en esta actividad se destacan los riesgos de seguridad y fugas asociados con el manejo del hidrógeno, ya que el H_2 es altamente inflamable y explosivo bajo ciertas condiciones, pudiendo representar un riesgo para la seguridad.

En la fase de operación de estos proyectos, se destaca entre los impactos positivos más relevantes, la generación de empleo, ya que surgen oportunidades de empleo en sectores relacionados, como la industria eólica, la industria química, la logística, la ingeniería ambiental y la gestión de recursos naturales.

Se debe mencionar, que uno de los posibles impactos significativos de esta fase es la creación de nuevos ecosistemas, ya que, a largo plazo, los aerogeneradores, los cables submarinos y la infraestructura del proceso de electrólisis (cuando está en la

configuración offshore), pueden tener un impacto positivo en el ambiente al actuar como arrecifes artificiales, fomentando la colonización de diversas especies marinas y contribuyendo a la biodiversidad local. Esta transformación de las comunidades biológicas locales no solo beneficia a los ecosistemas marinos, sino que también puede generar oportunidades económicas adicionales, como el ecoturismo y la investigación científica, que a su vez pueden impulsar el crecimiento económico y el desarrollo sostenible en las regiones costeras (Congressional Research Service, 2024).

En la fase de operación el medio más afectado podría ser el Físico, tal como se observa en la Figura 34, siendo los factores de la calidad del agua, los niveles de presión sonora y la calidad del aire los más relevantes. Además, el aumento de temperatura por la operación de equipos y transporte de electricidad a través de los cables también presenta incidencias significativas sobre la temperatura del agua.

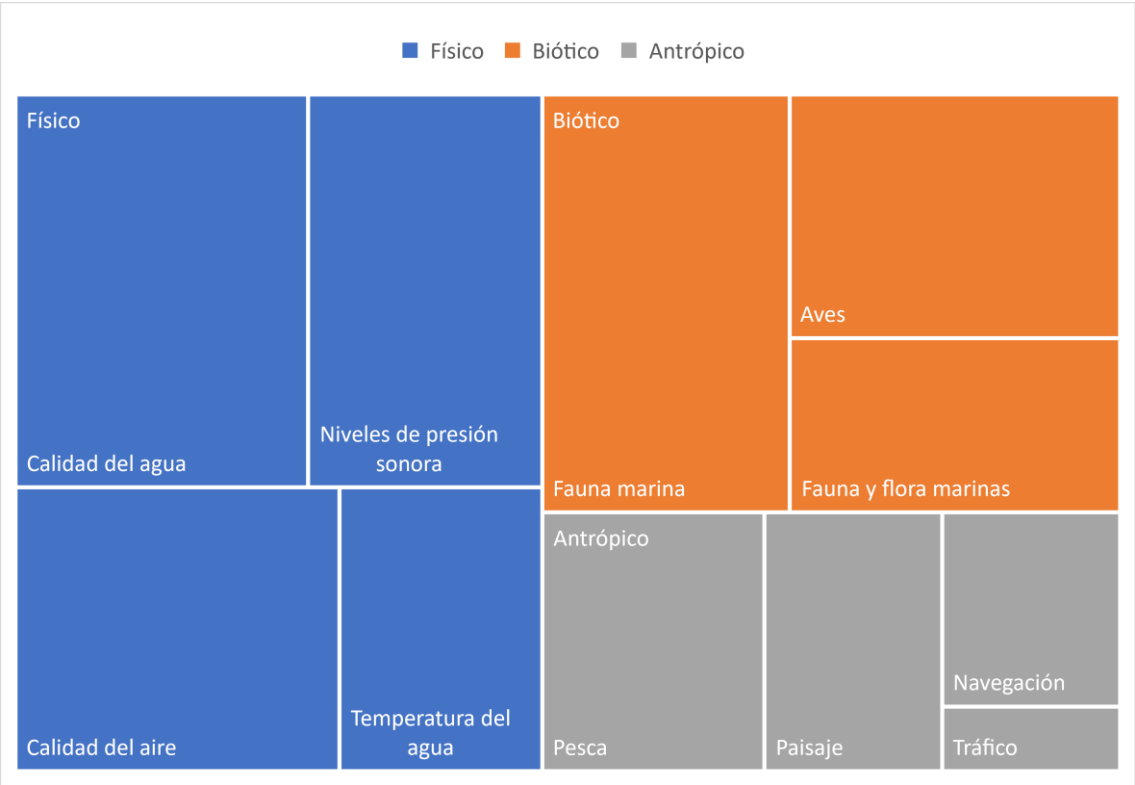


Figura 34. Principales factores ambientales afectados en la Fase de Operación.

El segundo medio más afectado es el Biótico, donde los factores más afectados son los relacionados con la fauna y flora marina y las aves, por los posibles efectos sobre las especies del área del proyecto, y colisiones de aves con las palas de los aerogeneradores.

En el medio Antrópico, los impactos más relevantes están relacionados con la afectación del sector pesquero, la afectación del paisaje, la navegación y el aumento del tráfico marítimo, por lo que será importante considerar cómo la operación del proyecto puede influir en las actividades humanas y el uso de los recursos naturales locales.

Capítulo IV. Evaluación de un proyecto hipotético ubicado en la Zona Económica Exclusiva (ZEE) del Uruguay

9. Análisis de los estudios de caracterización ambiental que se han hecho en la ZEE del Uruguay.

La Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Uruguay quedó definida por la Convención de las Naciones Unidas para el Derecho del Mar en 1982 (ANCAP, 2014, pág. 13). Abarca un área de 142.166 km², extendiéndose hasta 200 millas marinas desde las líneas de base establecidas en el artículo 14 de la Ley N° 17.033, y tal como se muestra en Figura 35. Este espacio marítimo, junto con la margen continental uruguaya, es vital desde perspectivas hidrodinámicas, topográficas, ecológicas y económicas.

Uruguay tiene el derecho de soberanía para explorar y explotar tanto los recursos vivos como no vivos dentro de la ZEE, incluyendo actividades económicas como la producción de energía. Es fundamental el manejo y uso sustentable de los recursos de la zona, junto con la protección y preservación de la biodiversidad y el ambiente marino.

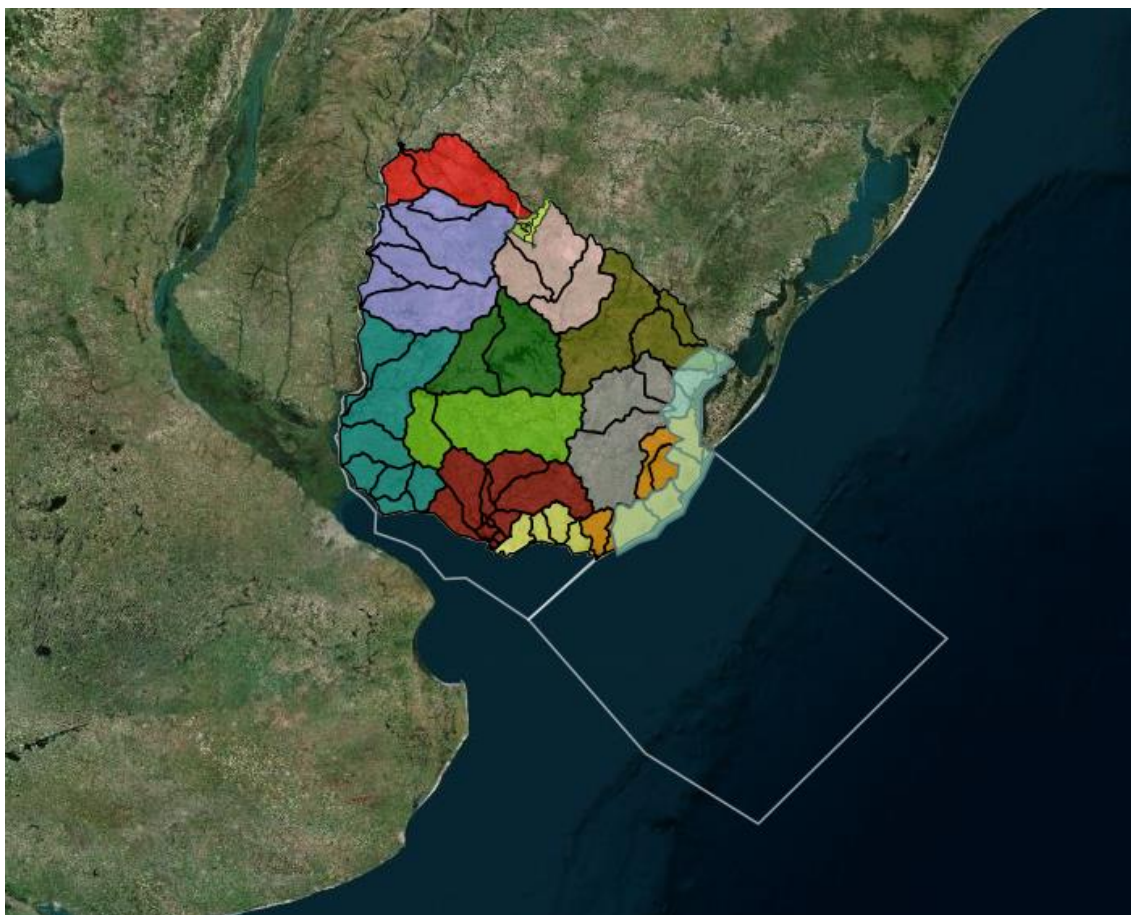


Figura 35. Recuadro con indicación de la ZEE del Uruguay. Fuente: Visualizador de Mapas del Ministerio de Ambiente del Uruguay.

Entre las fuentes más actualizadas de estudios de caracterización ambiental en la ZEE del Uruguay, se encuentra la Campaña Oceanográfica para la Elaboración de un Estudio

de Base Ambiental Regional de la ZEE de Uruguay. El estudio se enfocó en la ZEE en el mar, abarcando profundidades de aproximadamente 20 a 4,250 metros, de un área total que se observa en la Figura 36.

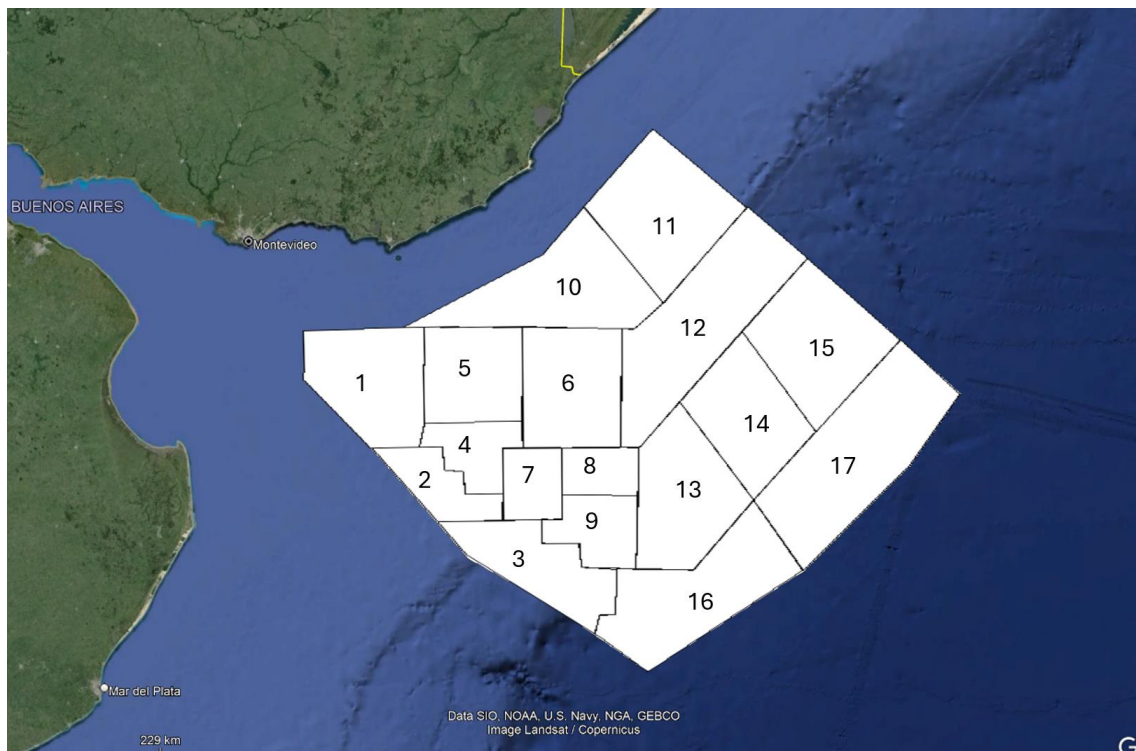


Figura 36. Áreas de la ZEE del Uruguay. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (ANCAP, 2016)

Además, el estudio de ANCAP dividió la ZEE en tres regiones diferentes con el fin de simplificar sus ubicaciones, como se observa en la Figura 37:

- Región 1: zona de plataforma (profundidades de 50 hasta 200 m aproximadamente)
- Región Intermedia: borde de plataforma (200-1.500 m de profundidad)
- Región 2: zona de talud (de 1.500 m a profundidades mayores a 4.000 m)

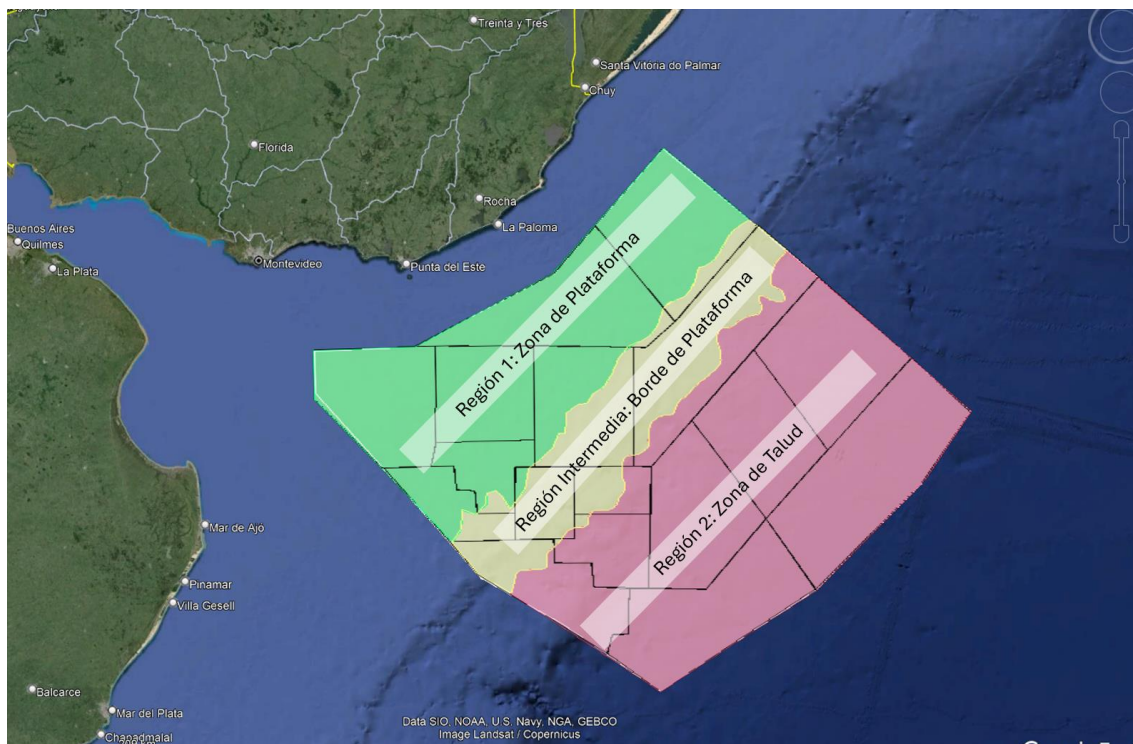


Figura 37. Regiones de la ZEE del Uruguay. Fuente: Elaboración propia con base en la información de ANCAP (2016).

La ZEE presenta características ambientales complejas; el medio físico muestra una dinámica compleja y variada, influenciada por factores como la hidrodinámica, la temperatura y salinidad, la circulación marina, y la hidroquímica. De acuerdo con ANCAP (2016, pág. v), la interacción entre aguas continentales y oceánicas en la plataforma continental genera un gradiente térmico significativo, con impactos en la producción biológica. La circulación de diferentes corrientes, indica una dinámica marina compleja que puede influir en el transporte de nutrientes, sedimentos y organismos a lo largo del margen continental.

9.1. Medio Físico

En conjunto, los factores físicos estudiados sugieren que la ZEE de Uruguay es un área con una dinámica ambiental diversa. Los principales hallazgos del Medio Físico realizados por ANCAP (2016) se resumen en la Tabla 18 a continuación:

Tabla 18. Resumen de resultados de estudios sobre el Medio Abiótico obtenidos a lo largo de la campaña de investigación en todo el ámbito de la ZEE de Uruguay realizada por ANCAP (2016). Fuente: Elaboración propia.

Característica	Descripción
Hidrodinámica	La ZEE muestra una gran influencia del Río de la Plata y la variabilidad de profundidades en la zona. En las capas superficiales la radiación solar y la temperatura atmosférica interactúan con la superficie marina, causando procesos adiabáticos que aceleran el calentamiento o enfriamiento del agua. En cambio, las variaciones en las capas más profundas son

Característica	Descripción
	menores y están relacionadas con la circulación de corrientes cercanas al fondo marino.
Temperatura y salinidad superficiales	La ZEE experimenta una importante interacción entre las aguas continentales y oceánicas. En la plataforma continental, se observa una baja salinidad y temperaturas ligeramente inferiores debido al flujo de agua continental del Río de la Plata. Además, se detecta la intrusión de aguas frías y salinas de origen oceánico desde el sur, así como la entrada de aguas cálidas y salinas por el noreste. Esta mezcla de masas de agua genera un significativo gradiente térmico entre las isóbatas de 200 y 2.000 metros, con importantes efectos en la producción biológica. Los valores de temperatura y salinidad superficial varían significativamente a lo largo del año. En las aguas superficiales (de 0 a 100 metros) los rangos de salinidad y temperatura se encuentran entre los valores de 35-36 PSU ("Practical Salinity Unit" o "Unidad Práctica de Salinidad"), 15-20 °C, respectivamente.
Circulación Marina	Hasta los 600 m de profundidad, el área se encuentra superficialmente afectada por tres corrientes, la corriente de la plataforma continental, la corriente de Brasil y la corriente de Malvinas. Entre los 40 y 600 m de profundidad, la intensidad de la corriente es decreciente.
Hidroquímica	La ZEE se caracteriza por la influencia de aguas de origen continental provenientes del Río de la Plata, con un aporte de nutrientes y materia orgánica, así como de aguas profundas de origen oceánico.

Característica	Descripción
Parámetros generales	Turbidez: La turbidez refleja la influencia de los aportes continentales con altos niveles de material particulado cerca de la costa (1-5 FTU), disminuyendo en aguas oceánicas (0,5 - 1 FTU). En todo el ámbito reportado, la turbidez fue mayor en superficie y decreciente con la profundidad. pH: se mantiene entre 7,7 y 8,2, típico de aguas marinas (SWAMP, 2024, pág. 3). Sólidos totales disueltos (STD): muestran distribuciones espaciales relacionadas con los aportes continentales, con valores máximos cerca de la desembocadura del Río de la Plata. Carbono Orgánico Particulado (COP) y Carbono Orgánico Disuelto (COD): varían según la influencia de aguas continentales, con concentraciones más altas en zonas someras (<50 m) con un máximo que supera 1 mg/L. Oxígeno disuelto: Se observa una estratificación clara; en aguas costeras se registran valores de 4-5 ml/L y ligeramente mayores en aguas oceánicas, alrededor de 4-6 ml/L. Nutrientes: Su distribución sigue un patrón común, con concentraciones bajas en la superficie y aumentando con la profundidad, alcanzando un máximo alrededor de los 1.000 metros. Las concentraciones varían espacialmente de la costa al talud, con mayores concentraciones cerca de la costa debido al aporte del Río de la Plata. Clorofila y Feo pigmentos: La concentración de clorofila es un indicador indirecto de la cantidad de fitoplancton en el agua y, por lo tanto, de su productividad. La clorofila tiende a ser más alta en la zona costera y muestra valores más altos en superficie, especialmente cerca de la desembocadura del Río de la Plata debido al aporte de nutrientes litógenos. Hidrocarburos: Los niveles obtenidos del análisis de hidrocarburos son inferiores a 0,2 mg/L, valores que no muestran indicios de contaminación en las aguas de la ZEE. Metales pesados y metaloides: los niveles de metales pesados encontrados en la ZEE son bajos, propios de elementos traza. Únicamente se pueden considerar el aluminio y hierro como metales mayoritarios.
Carbono Orgánico Total (COT)	En la margen continental de Uruguay, las concentraciones más altas de COT se registran en los fondos del talud medio y, en menor medida, en los fondos del talud inferior, hasta profundidades de 1.500-1.600 m en la vertiente más próxima a aguas argentinas. Las concentraciones en esta franja central de la ZEE oscilan entre 1 % y 3 %, con algunos máximos puntuales de hasta 8 %. En cambio, los valores sobre los fondos de la plataforma media y externa son inferiores, cercanos al 1,5 %, y aún menores en el resto de la plataforma continental.

Característica	Descripción
Nitrógeno Total	La concentración de nitrógeno total en los sedimentos marinos está relacionada con la biomasa acuática, siendo un indicador importante de la materia orgánica sedimentable. La relación atómica C/N se utiliza para distinguir entre diferentes orígenes de la materia orgánica, con valores cercanos a 6, correspondientes a materia orgánica marina (ANCAP, 2016, pág. 573). En la margen continental de Uruguay, las concentraciones de nitrógeno total siguen un patrón similar a las de carbono orgánico total, con las mayores concentraciones en el talud medio y los fondos adyacentes del talud inferior. En la zona central de la ZEE, las concentraciones promedio están alrededor del 0,38 %, con un máximo de 1,07 % en el talud medio en la zona sur de la ZEE, coincidiendo con los máximos de carbono orgánico total.

El medio biótico de la ZEE muestra una diversidad destacable en la región. De acuerdo con ANCAP (2016), dentro del plancton se destacan las cianobacterias y diatomeas, en el zooplancton, los copépodos son abundantes y para el ictioplancton se destaca la presencia de larvas de anchoa y otras especies. En los bentos, los poliquetos son prominentes, al igual que los equinodermos en la megafauna de profundidad. En el necton, se identificaron numerosas especies de peces y aves, con una disminución de la abundancia relacionados con la profundidad y distancia de la costa. Aunque la información sobre quelonios (tortugas) y mamíferos marinos es limitada, se observaron diversas especies de cetáceos y avistamientos de ballena jorobada, lobo marino y cachalote, destacando la diversidad en la zona.

9.2. Medio Biótico

A continuación, se resumen los principales hallazgos del Medio Biótico:

9.2.1. Plancton

El plancton se compone de organismos que viven libremente en mares y océanos, pero cuya capacidad de movimiento no les permite desplazarse horizontalmente por sí mismos, dependiendo en gran medida de los movimientos del agua (ANCAP, 2014, pág. 167). Por ello, su distribución espacial está mayormente determinada por las corrientes marinas de gran escala y los patrones locales de circulación. El plancton detectado dentro de la ZEE se clasifica en varios grupos, tales como:

- a) **Bacterioplancton:** Su estudio en la zona de interés del proyecto es muy incipiente y limitado (ANCAP, 2014, pág. 621). Sin embargo, se encontraron las cianobacterias que tienden a estar más presentes en aguas oceánicas influenciadas por corrientes subtropicales, mientras que pico y nanoflagelados pigmentados son más comunes en la zona sur sobre el talud. Las abundancias más altas de pico y nanoplancton se encuentran cerca de la superficie y hasta profundidades de 25 a 50 m con concentraciones que llegan a superar las 2×10^6 células/mL.
- b) **Fitoplancton:** las diatomeas dominan en las estaciones costeras, siendo los principales contribuyentes a la biomasa fitoplanctónica en aguas menos

- profundas. Sin embargo, en las estaciones oceánicas, los organismos motiles como los cocolitoforales, nanoflagelados y dinoflagelados son más abundantes.
- c) **Zooplankton:** los copépodos son el grupo taxonómico más abundante, especialmente en forma de copepoditos y nauplios. La distribución del zooplankton no muestra una clara relación entre la abundancia y la profundidad, pero se observa un ligero aumento en la riqueza conforme se aumenta la profundidad.
 - d) **Ictioplancton:** La anchoa es la especie más abundante en la zona, con sus huevos y larvas encontrados en el fondo sobre la plataforma continental hasta profundidades menores a 250 metros. La presencia de larvas en estadios avanzados en el talud sugiere un transporte desde la zona de puesta. Las estaciones con densidades elevadas de huevos y larvas de anchoa podrían estar relacionadas con áreas de menor salinidad debido a la desembocadura de ríos, lo que favorece el desarrollo del fitoplancton y zooplankton, alimentos de las anchoas. Las larvas de merluza se encuentran en fondos entre 50 y 150 metros. Las larvas de especies oceánicas, principalmente meso y batipelágicas en su fase adulta, están presentes en todo el talud y la región oceánica.

9.2.2. Bentos

Los bentos son organismos que viven en el fondo de cuerpos de agua. En la ZEE Los poliketos son el grupo taxonómico más importante, con el 57 % del total de los organismos identificados. La megafauna de profundidad (entre 250 y 4.000 m), se encuentra dominada por la presencia de equinodermos en términos de abundancia y de cordados (mayoritariamente peces óseos) en términos de biomasa (ANCAP, 2016, pág. 624).

En cuanto a la diversidad de especies las áreas 10 y 11, resaltadas en naranja en la Figura 38, tuvieron la mayor riqueza específica, mientras que las áreas 4, 3 y 8 tuvieron solo uno o dos registros. En total, ANCAP (2014, pág. 270) reporta 145 especies en el área de estudio, agrupadas en tres subclases, seis órdenes y 34 familias. Las familias Lumbrineridae, Ampharetidae, Aphroditidae y Eunicidae fueron las más comunes.

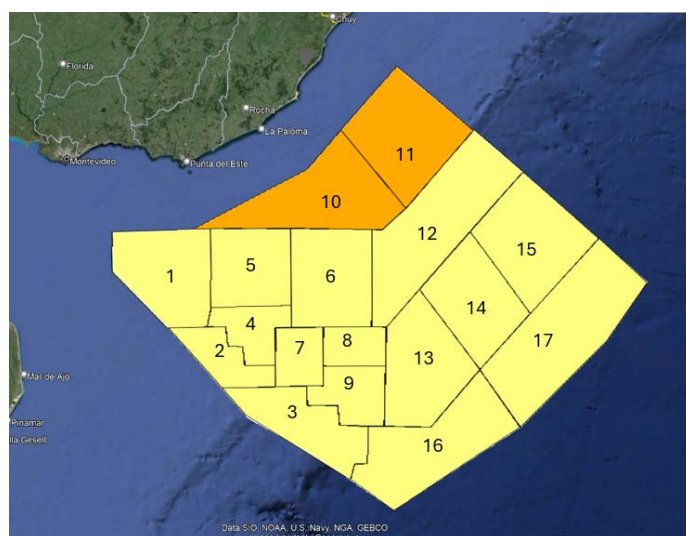


Figura 38. Zonas con mayor riqueza en diversidad de especies de Bentos. Naranja: Áreas con mayor riqueza.
Fuente: Elaboración propia con base en la información de (ANCAP, 2014, pág. 270).

Se resaltan varias especies adicionales en el área de estudio:

- Moluscos: Incluyen *Nassarius scissuratus*, una especie de nudibranquio (Dorididae), y quitones (Polyplacophora) pequeños.
- Polychaeta: Se han registrado formas de las familias Eunicidae, Sabellidae, Polynoidae, Aphroditidae y Maldanidae.
- Sipuncula, Priapulida y Echiura: Organismos de estos phyla fueron registrados.
- Pycnogonida: Colectados ejemplares de la familia Nymphonidae.
- Crustacea: Incluyendo Scalpellidae, Lepadidae, Ostracoda, Amphipoda, Isopoda, Cumacea y Decapoda. Destacan especies de Pinnotheridae, Majidae, *Propagurus gaudichaudi*, *Peltarion* sp., *Munida* sp. y *Chaceon notialis*.
- Echinodermata: Dominados por *Psolus patagonicus*, erizos de mar del orden Spatangioidea, *Pseudoechinus magellanicus*, diversas Ophiuroidea, y tres especies de Asteroidea: *Ctenodiscus australis*, *Benthopecten* sp. y *Asterinidae* sp.

En la plataforma predominan los hábitats de sustrato blando no vegetado, con comunidades de macrofauna bentónica. Se han identificado dos tipos principales de hábitats: arenas finas dominantes en la región y, en menor medida, arenas detríticas con restos biogénicos en áreas cercanas al talud (ANCAP, 2016, pág. 626).

9.2.3. Necton

El necton incluye especies animales grandes, como peces óseos y cartilaginosos, calamares, mamíferos marinos (ballenas, delfines, lobos y leones marinos), tortugas y aves marinas. Estos organismos ocupan los niveles tróficos más altos en el ecosistema marino y comparten características como madurez tardía, baja tasa reproductiva y longevidad, haciéndolos vulnerables a la disminución poblacional (ANCAP, 2014, pág. 197).

Las principales amenazas para el necton incluyen la interacción con la pesca, la contaminación marina, la degradación del hábitat y la presencia de especies introducidas. La ZEE de Uruguay alberga una alta diversidad de especies nectónicas, muchas de ellas de importancia comercial y con algún grado de amenaza.

Las especies nectónicas en esta área encuentran condiciones para su alimentación, reproducción, desarrollo, refugio y tránsito. Algunas son altamente migratorias, mientras que otras son endémicas. Aves marinas utilizan la zona para alimentarse, y tortugas como la tortuga laúd se alimentan allí, pero se reproducen en otras áreas. Los mamíferos marinos, como lobos y leones marinos, también buscan alimento en la ZEE. Además, varias especies de ballenas y delfines se encuentran en estas aguas, algunas de forma permanente y otras estacionalmente.

La comunidad de peces es abundante, incluyendo especies de gran relevancia económica como la merluza, que es el principal recurso pesquero de la región. Las pesquerías artesanal e industrial en Argentina y Uruguay dependen en gran medida de estas especies.

9.2.4. Peces

De acuerdo con ANCAP (2014), las áreas de la plataforma continental (Figura 39. Áreas 1, 5, 10 y 11) con profundidades de entre 20 y 100 metros registraron la mayor riqueza de especies tanto de peces óseos como cartilagosos. En áreas más profundas (50 a 4,000 metros), predominan las especies cartilaginosas.

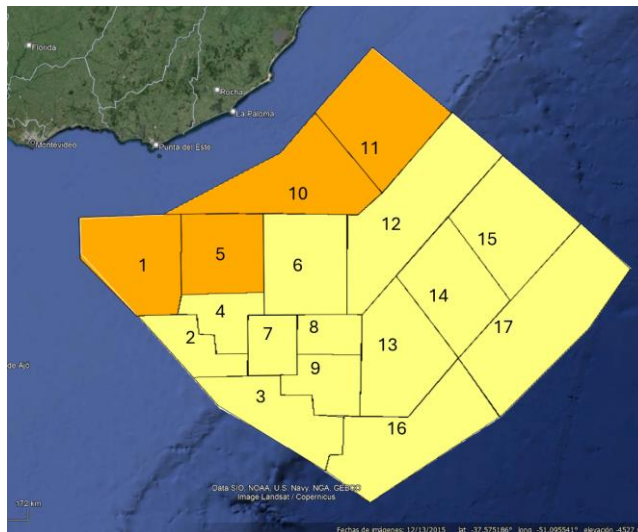


Figura 39. Áreas con presencia de peces. Naranja: Áreas con mayor presencia de peces óseos y cartilagosos. Fuente: Elaboración propia con base en la información de ANCAP (2014, pág. 210).

Las principales zonas de alimentación se encuentran cerca de la costa, especialmente en las áreas 1 y 5, resaltadas en la Figura 40 y en zonas más profundas predominan las especies cartilaginosas y la merluza (*Merluccius hubbsi*).

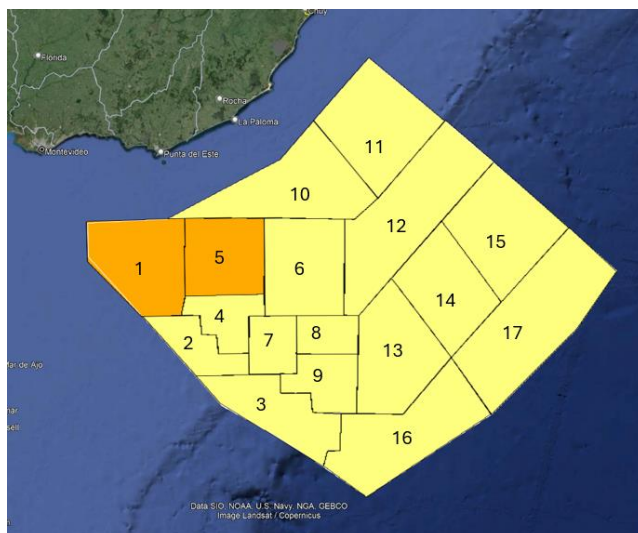


Figura 40. Zonas de alimentación de peces. Naranja: Principales zonas de alimentación de peces. Fuente: Elaboración propia con base en la información de ANCAP (2014, pág. 221).

La actividad reproductiva se concentra en áreas cercanas a la costa (Figura 41. Áreas 1, 5, 10 y 11), con poca investigación en profundidades mayores a 2,000 metros. El área 1 es la principal zona de cría de juveniles tanto de peces óseos como cartilagosos.

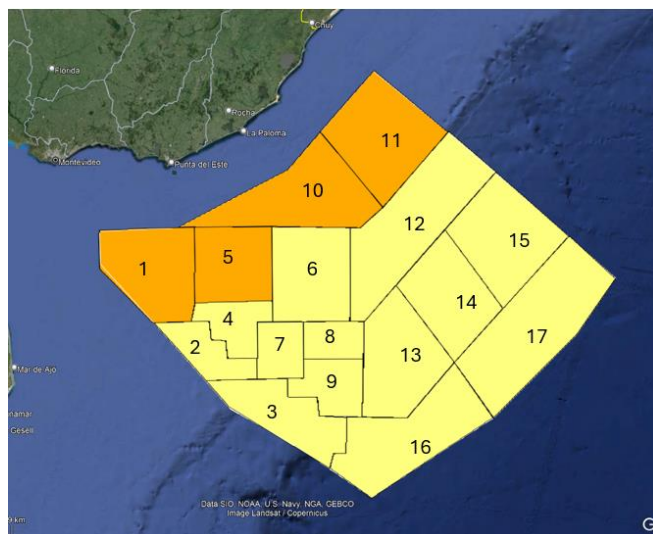


Figura 41. Zonas de reproducción de peces. Naranja: Principales zonas de reproducción de peces. Fuente: Elaboración propia con base en la información de ANCAP (2014, pág. 222).

Durante el estudio de ANCAP (2016) se identificaron en el ámbito en estudio 124 especies de peces pertenecientes a 36 familias. Las especies más abundantes se incluyen en las familias Macrouridae y Congridae, siendo dominante en líneas generales Macrouridae. La comunidad piscícola se agrupa según 4 sectores de profundidad: 0-1.100 m, 1.100-2.200 m, 2.200-3.300 m y 3.300-4.000 m. Se detectó la disminución de la abundancia y biomasa con la profundidad y, al igual que en el grupo de los equinodermos un incremento de la biodiversidad con la profundidad.

Una abundante comunidad de peces se encuentra presente en el área. Varias poblaciones de peces óseos, como corvinas (*Micropogonias furnieri*) y atunes (*Thunnus* spp.) y de peces cartilaginosos —tiburones y rayas— se alimentan, reproducen, migran y crían en las aguas oceánicas uruguayas (ANCAP, 2014, pág. 198).

9.2.5. Aves

En el estudio de ANCAP (2014), a partir de una revisión bibliográfica se generó un listado de 49 especies de aves marinas que ocurren en la ZEE, las cuales pertenecen a nueve Familias y cuatro Órdenes. Se confirmó la presencia de solo 16 especies; las Familias dominantes fueron Procellariidae (petreles, pardelas y paíños) con 19 especies y Diomedidae (albatros) con 10 especies.

En los resultados obtenidos por ANCAP (2016) se indica que las áreas 12 y 15, mostradas en amarillo en la Figura 42. presentaron el mayor número de especies confirmadas, mientras que el Área 11, mostrada en azul, tuvo el menor número, con solo una especie.

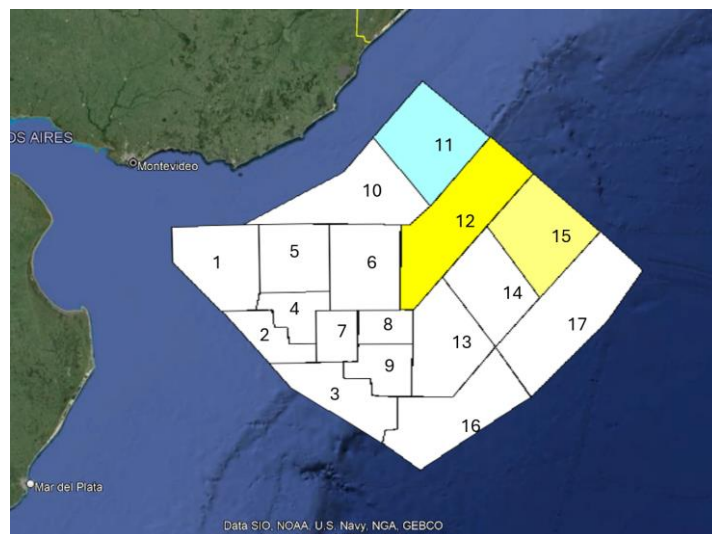


Figura 42. Áreas con mayor (amarillo) y menor (azul) avistamiento de aves. Fuente: Elaboración propia con base en información de ANCAP (2014).

Todas las áreas de la ZEE mostraron altos niveles de riqueza específica total, siendo el área 12, ubicada en el talud continental, la que presentó el mayor número de especies (49-50), y las áreas 1 y 5 las que tuvieron el menor (41-44). La mayor riqueza específica se concentró en la Región intermedia y en la Región 2 del talud continental entre las isóbatas de 200 y 3,500 m.

El petrel de barba blanca (*Procellaria aequinoctialis*, mostrado en la Figura 43) fue la única especie presente en todas las áreas y está globalmente amenazada como Vulnerable (ANCAP, 2014, pág. 207).



Figura 43. Foto del Petrel de Barba Blanca (*Procellaria aequinoctialis*). Fuente: ANCAP (2014).

De todas las especies presentes en la ZEE, el 12.2 % se consideran casi amenazadas y el 26.5 % están globalmente amenazadas de extinción (ANCAP, 2014, pág. 208). Entre estas, una es críticamente amenazada, seis están en peligro y siete son vulnerables. El área 12 tuvo el mayor número de especies en riesgo de conservación (9), seguido de las áreas 3, 6, 9, 15 y 17 (5-8 observaciones). En general, el área 11 tuvo el mayor número de especies globalmente en riesgo, con 19 especies. El SNAP de Uruguay identifica 18 especies de aves en la ZEE como prioritarias para la conservación (ANCAP, 2014, pág. 219).

La información actualizada proviene principalmente del estudio de la interacción de aves marinas con la pesca, destacando la captura incidental y la depredación por especies introducidas como principales amenazas, por lo que esto se debe tomar en cuenta para el levantamiento de línea de base de los estudios de impacto ambiental de los proyectos eólicos offshore, pues puede haber un sesgo en los resultados por la actividad pesquera y el número de aves detectado.

9.2.6. Reptiles

En los datos reportados por ANCAP (2016, pág. 516), se obtuvo poca información sobre tortugas marinas. Solo obtuvieron 4 avistamientos correspondiendo 3 de ellos a tortuga cabezona (*Caretta caretta*) y uno a tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*). Las tortugas cabezonas se observaron siempre en la región oceánica (Región 2). El avistamiento de tortuga laúd se realizó en aguas sobre la plataforma continental, a una profundidad de 49 metros y con una temperatura superficial de 16,2 °C.

En el reporte del 2014, ANCAP (2014, pág. 120) menciona que, en las aguas oceánicas de Uruguay, se encuentran cinco especies de tortugas marinas del orden Testudines. La familia Cheloniidae es la más diversa con cuatro especies, y la Dermochelyidae con una especie. Todas las tortugas marinas en Uruguay están amenazadas y son prioritarias para la conservación según el SNAP y el CITES. La presencia de al menos una especie se confirmó en todas las áreas de la ZEE, con el área 15 mostrando la mayor riqueza específica, tal como se resalta en naranja en la Figura 44. La tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*), en peligro crítico, se registró en todas las áreas, mientras que la tortuga cabezona (*Caretta caretta*) está presente en la mayoría excepto en las áreas 1 y 3.

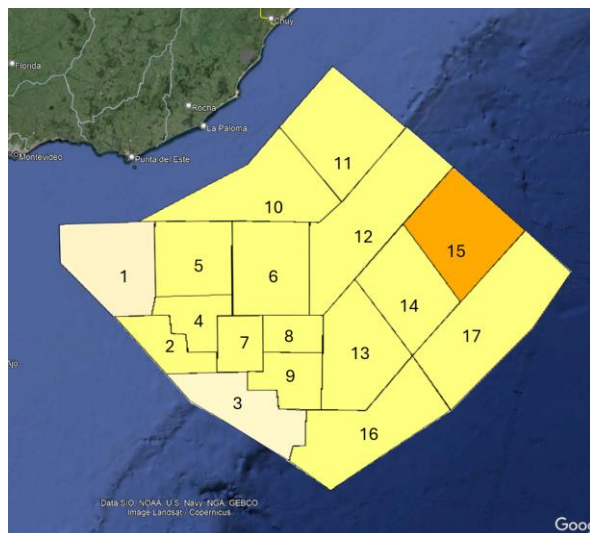


Figura 44. Áreas con mayor riqueza de presencia de tortugas. Naranja: Área 15, Zona con mayor riqueza; Amarillo: presencia de tortugas; Amarillo claro: áreas 1 y 3 sin presencia de tortuga cabezona. Fuente: Elaboración propia con base en la información de ANCAP (2014, pág. 210).

9.2.7. Mamíferos Marinos

En Uruguay se encuentran 39 especies de mamíferos marinos, divididas en dos órdenes: Carnívora (ocho especies) y Cetácea (31 especies) (ANCAP, 2014, pág. 216). De estas, 19 son residentes permanentes, nueve son migratorias y 11 aparecen ocasionalmente. En el reporte, ANCAP señala que la mayoría de los mamíferos marinos

de Uruguay son clasificados como de preocupación menor por la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) con una especie vulnerable, la franciscana, y tres especies de ballenas en peligro.

Los mamíferos marinos se han confirmado en 12 áreas de la ZEE, siendo el área 9 la que registró el mayor número de especies confirmadas, como se muestra en la Figura 45. Las áreas ubicadas en el talud continental (entre 200 y 2,000 metros de profundidad) presentan la mayor riqueza de especies, mientras que la plataforma continental y las profundidades mayores a 2,500 metros tienen menos especies.

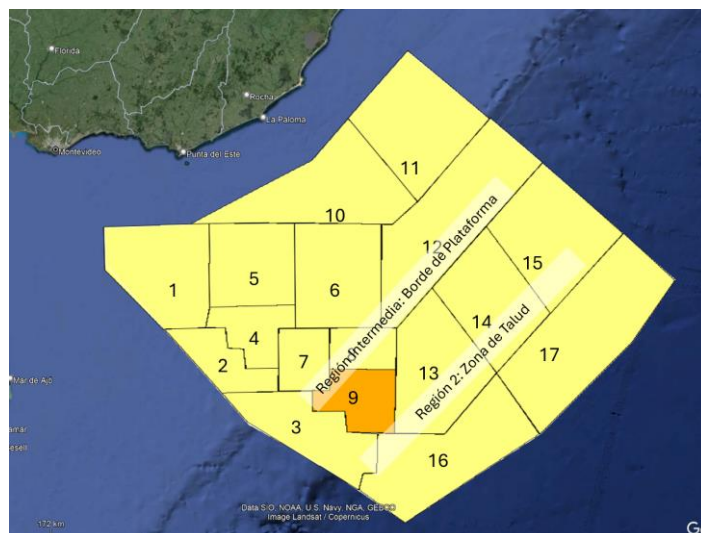


Figura 45. Áreas con mayor riqueza de presencia de Mamíferos Marinos. Naranja: Área 9, Zona con mayor riqueza; Amarillo: presencia de Mamíferos Marinos; Zona de Talud, mayor riqueza de especies. Fuente: Elaboración propia con base en la información de ANCAP (2014, pág. 214).

La *Orcinus orca* es el cetáceo con mayor ocurrencia confirmada en las áreas de la ZEE, seguido por *Globicephala melas*. *Otaria flavescens* es la única especie de Carnívora confirmada en estas áreas. Estos registros provienen de estudios sobre la interacción de mamíferos marinos con la pesquería de palangre industrial, por lo que también pueden estar sesgados. A continuación, en la Figura 46, Figura 47 y Figura 48 se muestran algunas imágenes de estas especies a modo referencial.



Figura 46. *Orcinus orca* Fuente: ANCAP (2014)



Figura 47. *Globicephala melas* Fuente: Google Fotos



Figura 48. *Otaria flavescens* Fuente: Google fotos.

A nivel nacional, las principales amenazas para los mamíferos marinos son la interacción con artes de pesca y, a nivel mundial, la contaminación acústica causada por actividades sísmicas como prospecciones de gas y petróleo (ANCAP, 2014, pág. 216).

Durante los estudios de ANCAP (2016, pág. 631) se observaron 9 especies de cetáceos, entre los que se puede destacar avistamientos de ballena jorobada, muy raros en la zona. Entre los avistamientos más frecuentes de mamíferos marinos en la ZEE destacan el lobo marino y el cachalote. Cabe mencionar que se detectaron grandes grupos de delfines sobre la plataforma y talud continental.

A lo largo de la costa uruguaya e islas se ubican asentamientos de lobos y leones marinos, los cuales realizan viajes hacia la ZEE en busca de alimento (ANCAP, 2014, pág. 198).

9.2.8. Cefalópodos

En las aguas uruguayas, se han identificado 14 especies de cefalópodos, entre decápodos y octópodos. En la ZEE, se encuentran calamares de los órdenes Spirulida y Teuthida, que son nadadores activos y habitan regiones pelágicas y neríticas (ANCAP, 2014, pág. 225). Los únicos octópodos incluidos en la ZEE pertenecen a la familia Argonautidae, que son pelágicos y tienen una concha externa protectora. A continuación, en la Figura 49, Figura 50 y Figura 51, se muestran algunas imágenes de estas especies a modo referencial.



Figura 49. *Illex argentinus* Fuente: ANCAP (2014)

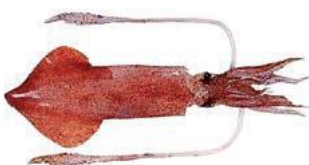


Figura 50. *Loligo sanpaulensis*. Fuente: ANCAP (2014)



Figura 51. *Onychoteuthis banksii* Fuente: ANCAP (2014)

Cuatro especies tienen registros confirmados en la ZEE: *Illex argentinus*, *Loligo sanpaulensis*, *Omastrephes bartrami* y *Onychoteuthis banksii*. *Illex argentinus* se encuentra en todas las áreas, *Loligo sanpaulensis* en la plataforma continental hasta 500 m de profundidad, *Omastrephes bartrami* a más de 2.000 m y *Onychoteuthis banksii* con un solo registro en el área 6, como se resalta en la Figura 52.

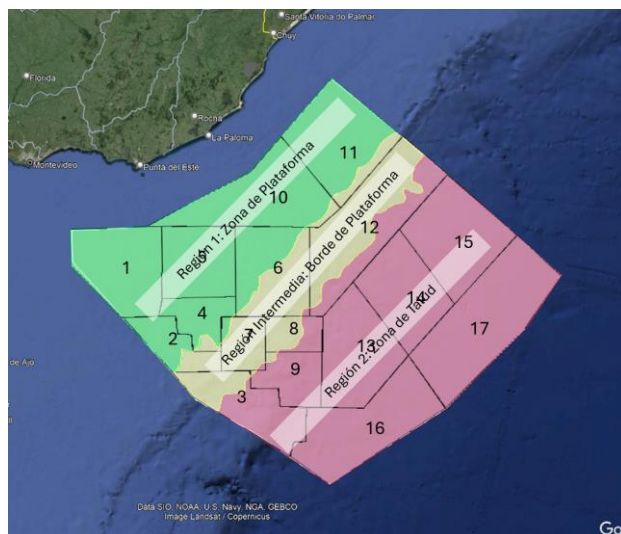


Figura 52. Áreas con presencia de Cefalópodos. *Illex argentinus* se encuentra en todas las áreas, Región 1: *Loligo sanpaulensis* en la plataforma continental; Región 2: *Omastraphes bartrami* a más de 2.000 m. Fuente: Elaboración propia con base en la información de ANCAP (2014, pág. 214).

El *Illex argentinus* se reproduce y cría en profundidades desde menos de 50 m hasta más de 2,000 m. *Illex argentinus* y *Loligo sanpaulensis* son explotadas comercialmente por las flotas pesqueras de Argentina y Uruguay, siendo *Illex argentinus* la principal especie capturada (ANCAP, 2014, pág. 227).

9.3. Medio Antrópico

En el informe de ANCAP (2014) se presenta un resumen de las principales especies y recursos pesqueros, tipos de pesquería, categoría y tipo de explotación. A continuación, se resumen los principales:

9.3.1. Actividades y Recursos de Pesca:

- a) **Corvina (*Micropogonias furnieri*) y Pescadilla de Calada (*Cynoscion guatucupa*):** Son los principales recursos de la pesca costera uruguaya, explotados tanto por pesca artesanal como industrial. La pesca se realiza principalmente por arrastre y en profundidades menores a 50 m en el Río de la Plata y el sector Atlántico de la ZEE uruguaya.
- b) **Merluza (*Merluccius hubbsi*):** Distribuida en el Atlántico Sudoccidental, se pesca principalmente con arrastre de altura, como se muestra en la Figura 53. Sus máximos de abundancia ocurren en invierno. Se ha implementado un plan de manejo para la recuperación del recurso, incluyendo áreas de veda ajustadas estacionalmente para proteger a los juveniles.
- c) **Merluza Negra (*Dissostichus eleginoides*):** Se pesca con palangre de fondo y nasas. Los juveniles migran a lo largo de la plataforma continental uruguaya, mientras que los adultos no se encuentran en la ZEE de Uruguay.
- d) **Papamosca (*Cheilodactylus bergi*):** Es una especie longeva con desoves parciales durante el año. Se reproduce principalmente en marzo y abril.

La pesquería de estas especies se realiza principalmente con técnicas de arrastre de fondo, nasas y palangre de fondo, en las zonas que se muestran en la Figura 53 y Figura 54.

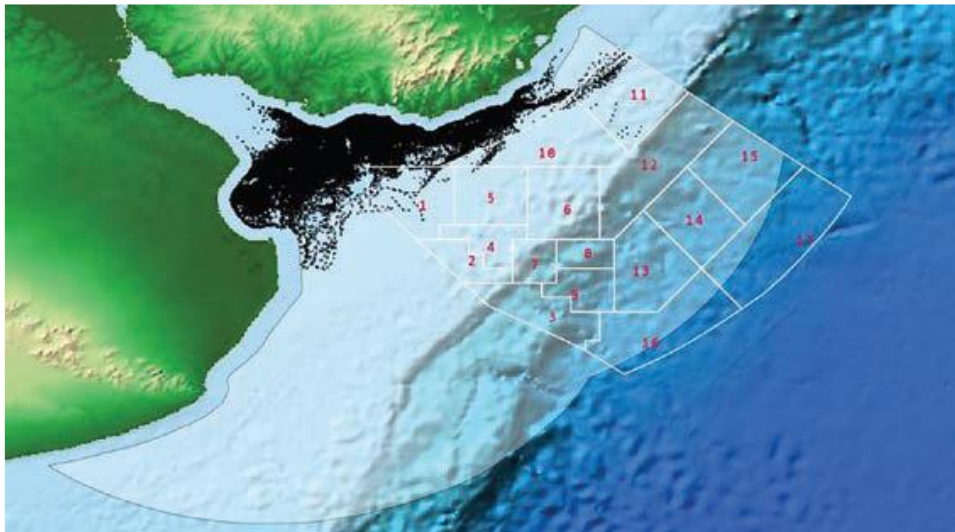


Figura 53. Área de operación de la flota de arrastre costero. Se observa una superposición de esta actividad con las áreas 1, 5, 10 y 11. Fuente: Extraída de ANCAP (2014, pág. 296)

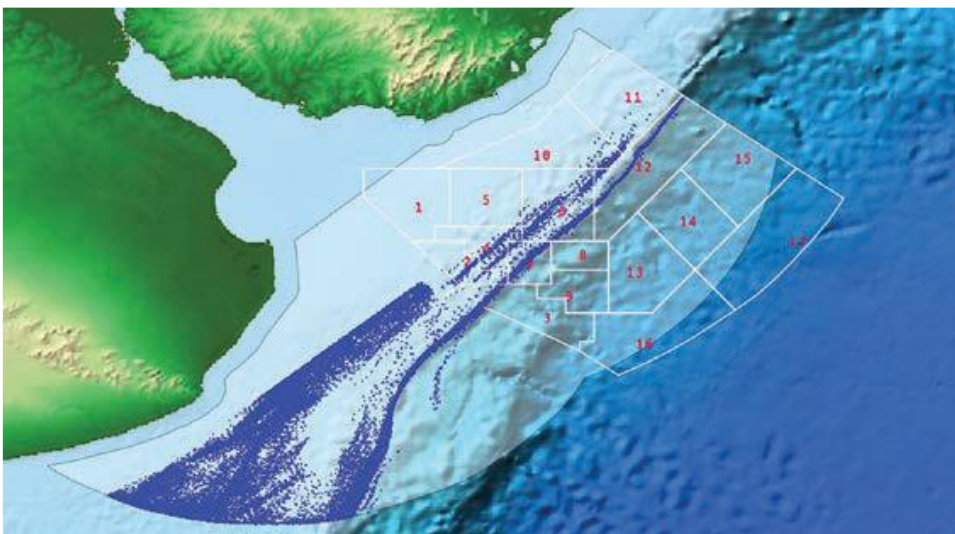


Figura 54. Área de operación de la flota de arrastre de merluza. Se observa una superposición de esta actividad con las áreas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11 y 12. Fuente: Extraída de ANCAP (2014, pág. 297)

- a) **Rayas (Rajidae):** Varias especies de rayas son comunes en las comunidades demersales y capturadas frecuentemente por arrastreros de fondo, además de una explotación dirigida con palangre de fondo. Son vulnerables a la presión de pesca debido a su crecimiento lento, baja fecundidad y madurez tardía.
- b) **Rouget (*Helicolenus dactylopterus lahillei*):** Especie acompañante de la merluza en la pesca de arrastre de fondo. Relativamente abundante en el talud y la plataforma continental, distribuyéndose desde Santa Catarina, Brasil, hasta Argentina.

- c) **Besugo (*Pagrus pagrus*):** Especie de alto valor comercial, pescada con trampas o anzuelos.
- d) **Cherna (*Polyprion americanus*):** Pescada en el borde del talud en zonas localizadas entre 300 y 500 m de profundidad. Es longeva y de crecimiento lento, concentrándose en áreas de coral.
- e) **Pez espada (*Xiphias gladius*):** Habita aguas tropicales, templadas y frías de todos los océanos. Es una de las principales especies capturadas en Uruguay,
- f) **Atún ojo grande (*Thunnus obesus*):** Capturado principalmente en la ZEE de Uruguay con cuotas asignadas por la CICAA.
- g) **Atún aleta amarilla (*Thunnus albacores*):** En Uruguay, se captura principalmente en la ZEE, con una talla mínima de retención establecida.
- h) **Atún albacora (*Thunnus alalunga*):** Especie altamente migratoria, habita aguas tropicales y templadas. En Uruguay, se han obtenido buenos rendimientos de captura, especialmente con el palangre profundo.

De acuerdo con ANCAP (2014, pág. 343), la mayor parte de la actividad pesquera en Uruguay ocurre en el área asociada al talud continental de Uruguay, zona que de acuerdo con Ministerio de Ambiente del Uruguay (2021) se ubica entre los 200 y 4.000 m de profundidad. Este espacio es destacado por sus particularidades oceanográficas, siendo muy rico en nutrientes y de varias especies de grandes peces pelágicos, como el pez espada y el atún aleta amarilla. Específicamente, se menciona que entre un 80 y 97 % de los individuos capturados son adultos, con una mayor concentración entre los 100 y 200 m de profundidad.

Además, se destaca que el esfuerzo pesquero se desarrolla prácticamente en toda la ZEE de Uruguay, abarcando casi en su totalidad las áreas delimitadas para la ZEE (ANCAP, 2014, pág. 344). Estos hallazgos resaltan la importancia de las áreas del talud continental y de la ZEE uruguaya para la actividad pesquera, marcando la necesidad de manejar de forma sostenible estos recursos naturales para asegurar su viabilidad a largo plazo.

9.3.2. Otras Actividades Antrópicas

9.3.2.1. Tránsito de Buques

El Río de la Plata muestra un tránsito intenso de buques mercantes que ingresan y egresan con mercancías. ANCAP (2014, pág. 352) identifica varias áreas clave de tránsito y espera para buques mercantes. Por ejemplo, como se observa en la Figura 55 las áreas de alijo (A, B, C, D y S) y los sectores de tránsito (1 a 6). En particular, el sector 5 se identifica como una zona de espera generada por buques que cargan gas licuado de petróleo.

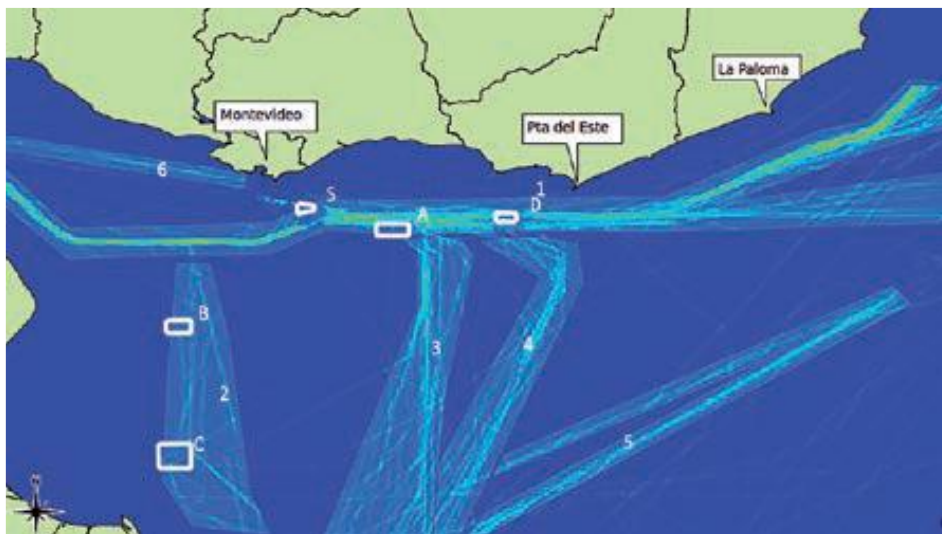


Figura 55. Zonas de tránsito y alijo. Sector 1, con el mayor tránsito en dirección E-W y próxima a la costa uruguaya. Sector 2 de navegación entre áreas de alijo B, C y zona 1; sectores 3 y 4, donde los buques se desplazan en sentido - S; y sector 5 de espera. El sector 6 representa navegación de cabotaje —línea de pasajeros Montevideo – Buenos Aires. Fuente: Extraída de ANCAP (2014, pág. 353)

Las rutas de tránsito establecidas entre Buenos Aires y Montevideo, así como hacia el este de Montevideo, son especialmente intensas. El reporte menciona que gran parte de esta navegación es dirigida por la Autoridad Marítima a través de un corredor de aguas seguras.

9.3.2.2. Cableado Submarino

La longitud total de los cables en la Zona Económica Exclusiva (ZEE) uruguaya se estima en 2.566 km, con aproximadamente 900 km en profundidades superiores a 1.000 metros (ANCAP, 2014, pág. 354), como se muestra en la Figura 56. Se asume una exclusión pesquera de 1.852 metros a cada lado, lo que representa un área de 9.504 km²

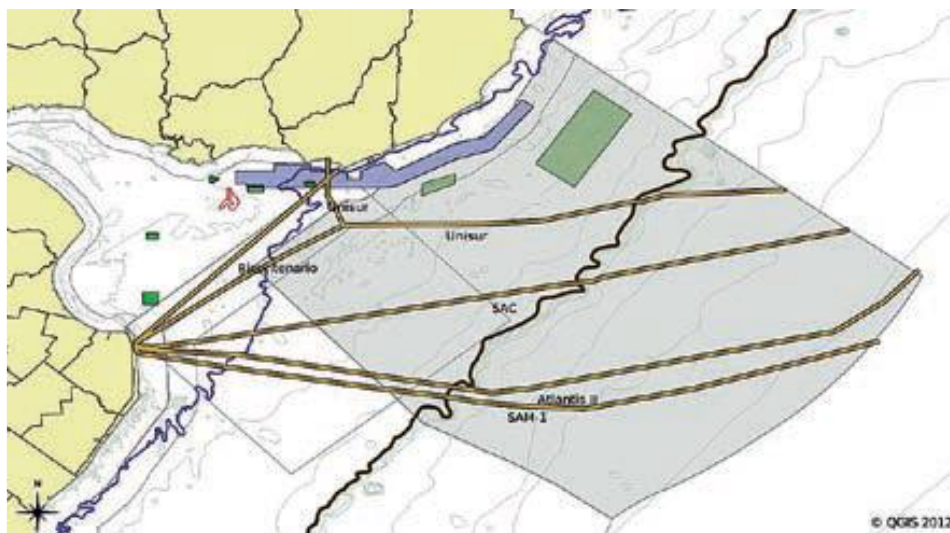


Figura 56. Ubicación de áreas y cables submarinos activos. Fuente: Extraída de (ANCAP, 2014, pág. 348)

Se han reportado daños en los cables debido a operaciones de pesca, especialmente en áreas donde los cables están sobre el lecho marino y no enterrados. Esto se atribuye

principalmente a la explotación de especies en mayor profundidad, como la merluza negra (ANCAP, 2014, pág. 361).

9.3.3. Áreas de conservación

En base a la información del Visualizador de Mapas del Ministerio de Ambiente, se pueden identificar las áreas de conservación que están dentro de la ZEE.

9.3.3.1. Áreas Protegidas

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente de Uruguay (Ministerio de Ambiente, 2022), Uruguay está actualmente en un contexto de creciente desarrollo en su territorio marino, con la incorporación de nuevas actividades como la exploración de hidrocarburos y la creación de parques eólicos offshore, que se suman a las actividades tradicionales como la pesca, el tráfico marítimo y el cableado submarino. A nivel internacional, Uruguay es signatario del Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD) desde 1993, donde se comprometió a proteger el 10 % de su superficie marina mediante Áreas Marinas Protegidas efectivas y representativas para el año 2020. Actualmente, estas metas están en revisión, proponiéndose un nuevo objetivo de proteger el 30 % del planeta para 2030 (Ministerio de Ambiente, 2022).

Dentro de la ZEE se encuentran zonas que se encuentran ingresadas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), o zonas que han sido declaradas sitios prioritarios para la conservación en el espacio marino de Uruguay. En la Figura 57 se puede identificar estas áreas:

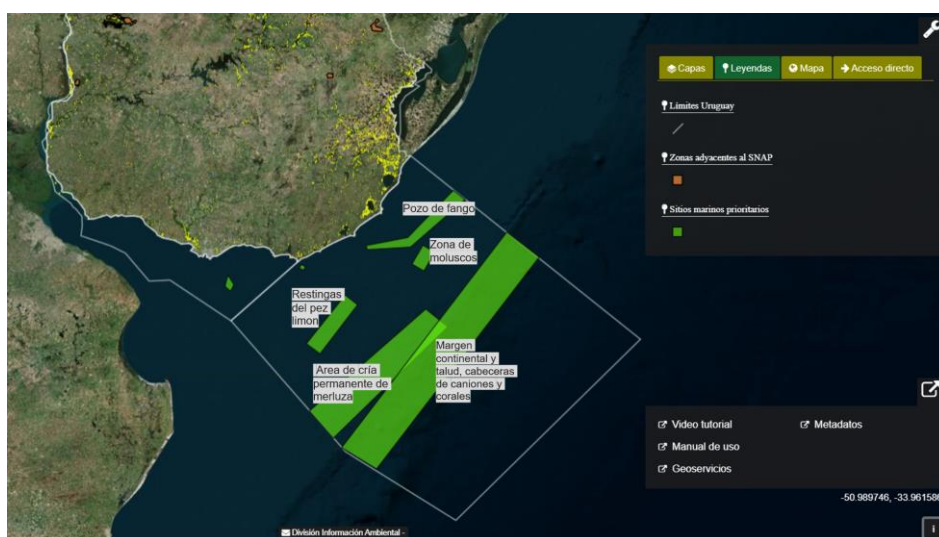


Figura 57. Zonas dentro de la ZEE que se encuentran ingresadas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP). Fuente: SNAP

- a) **Restingas del Pez Limón:** Ubicado entre los 20 y 40 metros, estas áreas proporcionan refugio y alimento gracias a invertebrados adheridos a las rocas. Son importantes para pescadores deportivos y artesanales. De acuerdo con el (Ministerio de Ambiente, 2022) estudios específicos son necesarios para entender su biodiversidad, habiéndose registrado una notable diversidad de invertebrados bentónicos y especies bioingenieras, como ascidias, poríferos, anémonas, estrellas, peces criptobénticos, y ovículos de peces cartilaginosos.

- b) **Pozo de Fango:** El Pozo de fango, ubicado en la plataforma costera uruguaya, es un importante hábitat para fauna bentónica de interés ecológico y pesquero. A 50 km de La Paloma, con profundidades superiores a 50 m, alberga especies como el caracol negro, caracol fino, caracol bola, almeja blanca y lenguados, siendo una potencial zona de reproducción. También es relevante para tiburones y rayas, y tiene valor histórico por el hundimiento del Buque “ROU 32 Valiente” en el 2000. (Ministerio de Ambiente, 2022).
- c) **Zona de Moluscos:** Los fondos de arena y fango con concentración de moluscos son importantes por su valor socioeconómico, cultural y científico, albergando bancos de mejillones, ostras y diversas especies de almejas, vieiras, pulpos, caracoles, calamares y cangrejos ermitaños (Ministerio de Ambiente, 2022). Presenta concentraciones importantes de juveniles de anchoíta, esenciales para la merluza y la pescadilla.
- d) **Área de cría de merluza:** Es un hábitat de relevancia ecológica y socioeconómica. Históricamente, ha habido alta abundancia de juveniles y adultos reproductores en otoño. La explotación pesquera desde los años 80 ha ejercido una fuerte presión, con la biomasa actual por debajo del 40 % de los niveles de los años 80. Aunque hay signos de recuperación, es crucial proteger la zona de otros usos perjudiciales. La Comisión Técnico-Mixta del Frente Marítimo establece vedas temporales basadas en campañas de evaluación. Además, existen bancos de vieira (*Zigochlamys patagonica*) relevantes para la conservación por su función como hábitat para diversas especies. La corriente subantártica de Malvinas enriquece el área con nutrientes, favoreciendo la producción primaria (Ministerio de Ambiente, 2022).
- e) **Margen continental:** Desde los 200 m hasta los 1000 m de profundidad, es crucial para la conservación debido a su diversidad de hábitats y procesos hidrodinámicos que resuspenden nutrientes y sedimentos. Alberga cañones submarinos, pockmarks y montículos de corales arborescentes que crean hábitats complejos para diversas especies. Estos arrecifes son hotspots de biodiversidad, comparables a los arrecifes de aguas someras. También son importantes para pesquerías, proporcionando refugio y alimento a especies comerciales como merluza, abadejo, y cangrejo rojo. La zona alberga crustáceos de interés comercial y ecológico, así como grandes tiburones, atunes, pez espada, orcas y cachalotes (Ministerio de Ambiente, 2022).

9.4. Marco legal ambiental

La constitución vigente de la República Oriental del Uruguay (República Oriental del Uruguay, 1967) establece en su Artículo 47 que la protección del medio ambiente es de interés general, y la prohibición de actos que causen depredación, destrucción o contaminación graves. Además, define la política de aguas basada en el ordenamiento del territorio, la conservación ambiental, la gestión sustentable de recursos hídricos y prioriza el abastecimiento de agua potable a poblaciones, anteponiendo lo social sobre lo económico, involucrando a usuarios y a la sociedad civil a que participen en la planificación y gestión de recursos hídricos.

La Ley N° 17.033 (1998) en su Artículo 5: Otorga a Uruguay derechos de soberanía en la ZEE para la exploración, explotación, conservación y administración de los recursos naturales, incluyendo la producción de energía derivada del agua, corrientes y vientos.

La Ley 16.466 (República Oriental del Uruguay, 1994) y el Decreto 349/005 (República Oriental del Uruguay, 2005) mencionan las actividades que por su naturaleza deben conllevar previo a su construcción, el otorgamiento de una Autorización Ambiental Previa (AAP), incluyendo:

- Construcción de nuevos puertos y remodelación de los existentes.
- Construcción de terminales de trasvase de petróleo o productos químicos.
- Construcción de oleoductos y gasoductos superiores a 10 km.
- Instalación de plantas de tratamiento de residuos sólidos y apertura de sitios de disposición final.
- Construcción de usinas de generación de electricidad superiores a 10 MW.
- Construcción de líneas de transmisión de energía eléctrica superiores a 150 kV.
- Dragado de cursos o cuerpos de agua con fines de navegación.
- Construcción de muelles, escolleras o espigones.

Además, el decreto el Decreto 349/005 presenta otras autorizaciones ambientales como la Autorización Ambiental Especial (AAE; no aplicaría para este tipo de proyectos) y Viabilidad Ambiental de Localización (VAL; dependiendo de la estructura que se haya elegido para el proyecto y las jurisdicciones aplicables), así como diversos permisos para la fase de Operación.

La Ley 17.283, también conocida como la Ley General de Protección del Medio Ambiente, establece el marco general para la protección ambiental en Uruguay.

La Ley N° 17.234 de Creación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) establece la creación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) en Uruguay. Esta ley se enfoca en la conservación de la biodiversidad y la gestión sostenible de áreas naturales en el país.

La legislación ambiental uruguaya abarca un amplio listado de leyes y decretos que cubren desde la protección contra la contaminación de residuos de cualquier tipo hasta la regulación de la calidad del aire, el ruido, los campos electromagnéticos y el agua, como también protección a la fauna y flora, áreas naturales protegidas entre otras, de las que se debe ir definiendo su aplicabilidad en cada caso de proyecto específico.

10. Resultado del análisis de los principales impactos ambientales y medidas propuestas en un proyecto ubicado en la Zona Económica Exclusiva del Uruguay

En la sección 9 de este documento se detallaron las características de los medios físico, biológico y antrópico de la ZEE de Uruguay. Partiendo de estos resultados, se limitará el área de la ZEE en la que sea factible la construcción de un proyecto eólico offshore.

Tal como se explicó en la sección 4.3, existe una limitación tecnológica importante para las fundaciones del aerogenerador cuando son de tipo fija, llegando a profundidades máximas que están entre 60-80 m. Las fundaciones de tipo flotante pueden llegar a

profundidades mayores pero sus altos costos pueden inviabilizar los proyectos, por lo que se descartarán áreas con profundidades mayores a 100 m, habilitando únicamente como zonas factibles desde la costa del país hasta la Región 1.

Se descartarán también las áreas categorizadas como protegidas. En la delimitación se tomarán en cuenta las principales rutas de buques mercantes, zonas pesqueras entre otros. En la Figura 58 se muestra en verde el área delimitada y el análisis, a partir de ahora, se enfocará en esta zona. La delimitación de la zona se hizo en base a la información general estudiada y plasmada en la sección 9, y se utilizará para identificar los impactos ambientales generales de la zona. Un mayor detalle en la delimitación necesitará de un análisis exhaustivo de la información tomando en cuenta muchos más elementos.

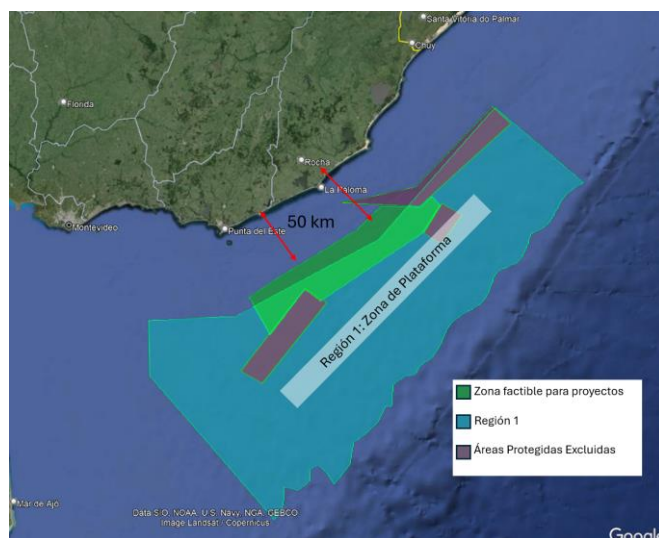


Figura 58. Delimitación de la Zona factible para proyectos eólicos offshore dentro de la ZEE. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentarán los principales impactos ambientales que pueden afectar la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Uruguay. Los impactos seleccionados fueron los identificados como los más significativos en cada fase del proyecto estudiada en la sección 8.

Partiendo de los impactos ambientales identificados, se analizará cómo cada uno de estos afecta a los diversos factores ambientales caracterizados para la ZEE en la sección 9. Esto incluye una evaluación de la influencia de los impactos en el medio físico, biótico y antrópico. Posteriormente se evaluará el nivel de afectación de cada impacto sobre los distintos factores ambientales. Este cruce permitirá identificar cuáles son los medios y factores ambientales más vulnerables o significativamente afectados en cada fase del proyecto. Finalmente, con base en esta identificación, se orientarán las medidas de mitigación y recomendaciones hacia esos elementos específicos, asegurando medidas más eficaces y focalizadas que minimicen los efectos adversos del proyecto.

10.1. Fase de desarrollo

Durante la fase de desarrollo de un parque eólico offshore en la ZEE de Uruguay, se identificaron posibles impactos ambientales relevantes que pueden terminar en impactos significativos si no se incluyen medidas de mitigación o compensación apropiadas.

A continuación, en la Figura 59 se muestra un análisis de los principales factores ambientales mayormente afectados por los impactos ambientales más relevantes identificados en la sección 8.1, de acuerdo con las características que se encuentran en la zona de la ZEE.

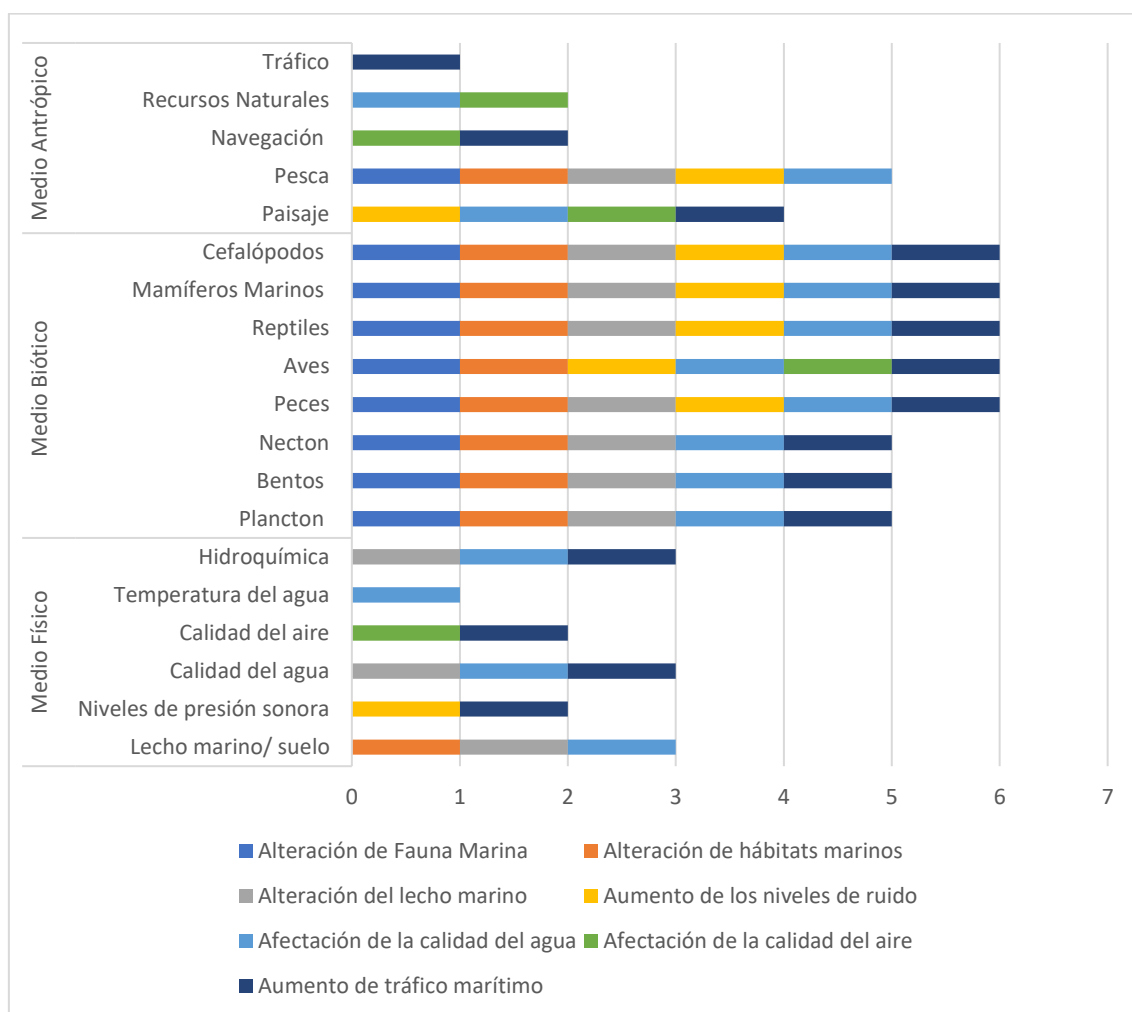


Figura 59. Principales factores ambientales impactados durante la fase de desarrollo para la ZEE.

Entre los principales impactos en la fase de desarrollo se incluyen la alteración de la fauna marina, aumento en los niveles de ruido, aumento del tráfico marítimo, la afectación de la calidad del agua y el aire, la alteración del lecho marino y la alteración de los hábitats marinos.

Los factores ambientales que se ven más afectados están relacionados con el Medio Biótico y esto es principalmente porque hay impactos que, aunque están relacionados directamente con un elemento específico, puede afectar todos los factores del medio. Por ejemplo, la alteración del lecho marino no solo afecta la estructura física del fondo

marino, sino también a las especies que dependen de él. Los peces, mamíferos marinos y otras formas de vida se ven directamente afectados por esta alteración. Además, el aumento de los niveles de ruido puede perturbar a la fauna marina, alterando su comportamiento y su capacidad para comunicarse y reproducirse.

En cuanto al medio físico, la afectación de la calidad del agua es un factor crítico, ya que contaminantes químicos y cambios en la hidroquímica pueden dañar la vida acuática y afectar el entorno. Por otro lado, la afectación de la calidad del aire también es relevante, los contaminantes atmosféricos pueden afectar la respiración de las especies marinas y alterar la calidad del entorno.

En cuanto a la alteración de la fauna marina, se destaca cómo las actividades de exploración pueden afectar a especies, como mamíferos marinos, peces, tortugas marinas (reptiles) y cefalópodos. Especialmente los estudios geofísicos y geotécnicos pueden impactar a los peces óseos principalmente a través de daños físicos, como barotrauma en la vejiga natatoria y daño a los otolitos (Oisín, Rogério, & Coca, 2023, pág. 16), así como efectos conductuales, incluyendo la evitación del sonido. Estos impactos pueden alterar comportamientos críticos como la búsqueda de alimento y la reproducción. Cabe resaltar que, en la zona identificada como factible para instalación de proyectos en la Figura 58. Delimitación de la Zona factible para proyectos eólicos offshore dentro de la ZEE. Fuente: Elaboración propia fue donde se identificó la mayor cantidad de peces óseos, como se explicó en la sección 9.2.4.

El aumento de los niveles de ruido derivado de los estudios geotécnicos y geofísicos también se identifica como un factor de preocupación, con potenciales efectos adversos en mamíferos marinos, peces, reptiles y cefalópodos, ya que las actividades que generen altos niveles de presión sonora, y el pilotaje en particular produce impulsos intensos que pueden inducir discapacidad o pérdida de audición en mamíferos marinos a corta distancia y pueden alterar el comportamiento de los mamíferos marinos a distancias de hasta decenas de kilómetros; se sospecha que las tortugas marinas pueden tener un comportamiento similar (Congressional Research Service, 2024 , pág. 11).

Sobre los invertebrados marinos, se han observado aumentos en los bioindicadores de estrés, como glucosa, proteínas de choque térmico, linfocitos y hormonas de estrés en la hemolinfa de invertebrados marinos expuestos a ruido marino. Estos indicadores pueden también sugerir impactos en las respuestas inmunitarias, pero se necesita más información para entender los efectos a largo plazo (Oisín, Rogério, & Coca, 2023, pág. 54).

La alteración de hábitats puede impactar directamente en comunidades de plancton y bentos, alterando la disponibilidad de alimento para especies más grandes y afectando la estructura de la red trófica marina.

Sobre los cefalópodos, se detectaron especies en la zona seleccionada. Los estudios geofísicos y geotécnicos que utilicen principalmente cañones de aire pueden impactar a algunas especies como calamares y pulpos. Estos impactos incluyen daño físico a las células sensoriales de los estatocistos, estructuras cruciales para su equilibrio y orientación, cuando se exponen a sonidos de baja frecuencia (50-400 Hz) con niveles de hasta 175 dB pico (Oisín, Rogério, & Coca, 2023, pág. 61). Ya que estos estudios

suelen realizarse en condiciones de laboratorio, se necesitan más investigaciones para obtener resultados concretos.

El aumento del tráfico marítimo en el área de estudio resulta ser otro impacto para considerar, dado que la presencia de embarcaciones puede interferir con la fauna marina y aumentar el riesgo de colisiones, especialmente con mamíferos y aves marinos. Asimismo, la afectación de la calidad del agua debido a posibles derrames de embarcaciones o movimientos de sedimentos durante las actividades de construcción representa una amenaza para especies como el plancton, peces y bentos, ya que se ha demostrado que los derrames de combustibles pueden afectar significativamente a la fauna macro bentónicas del sitio, siendo inversamente proporcional su tasa de recuperación con la cantidad de combustible derramado (Zhou, 2019) .

Finalmente, la alteración del paisaje marino, influenciada por el aumento del tráfico marino por las embarcaciones que van a llevar adelante los estudios, podría perturbar a aves y mamíferos marinos que utilizan la zona para nidificar o descansar.

10.1.1. Medidas de mitigación y recomendaciones durante la fase de desarrollo

Se pueden presentar distintas medidas de mitigación para minimizar los impactos en la vida marina durante los estudios de exploración.

Medidas para impactos sobre el Medio Biótico:

- a) **Monitoreo visual de mamíferos marinos:** para detectar su presencia y tomar medidas preventivas si se encuentran cerca de las áreas de estudio. Protege a los mamíferos marinos de exposición a altos niveles de ruido, que pueden causarles daño físico y estrés.
- b) **Establecer Zonas de Exclusión Acústica:** Establecer zonas de exclusión alrededor de los barcos para asegurarse de que no haya macrofauna en la zona antes de iniciar las fuentes acústicas (BOEM. Bureau of Ocean Energy Management, 2018, pág. 2).
- c) **Inicios Suaves (Soft Starts):** De acuerdo con Duffy et al. (2023, pág. 80), consiste en aumentar gradualmente la potencia de la fuente acústica que se utilice para el estudio en pasos predeterminados para permitir que los peces y otros animales marinos se alejen del área de impacto antes de alcanzar los niveles máximos de ruido. Es recomendado para estudios que utilicen cañones de aire y otras fuentes acústicas intensivas.
- d) **Calibración preliminar de equipos:** Realizar pruebas preliminares de los cañones de aire antes de iniciar el estudio completo, ayuda a calibrar los equipos y minimizar el uso de potencia innecesaria, reduciendo así el ruido generado.
- e) **Evitar Temporadas de Desove y Cría:** Planificación de los estudios para evitar las temporadas de desove y cría de especies marinas identificadas.
- f) **Minimizar la Superposición de estudios en Tiempo y Espacio:** Evitar realizar múltiples estudios geofísicos y geotécnicos en la misma área o en áreas adyacentes de manera simultánea, permitirá la recuperación de las poblaciones de peces, mariscos y mamíferos marinos, reduciendo el estrés acumulado en el ecosistema.
- g) **Monitoreo Acústico Pasivo:** Uso de hidrófonos y otros equipos para detectar la presencia de vida marina y monitorear los niveles de ruido durante los

estudios. Permite una respuesta rápida a la presencia de mamíferos marinos y ajusta las operaciones del estudio en consecuencia.

- h) **Cierres Temporales y Espaciales:** Cerramientos en el área de estudio para proteger ballenas y tortugas marinas en sus hábitats críticos y rutas migratorias durante épocas específicas del año.
- i) **Planificación de tráfico marítimo:** Establecer rutas de navegación y velocidades máximas para las embarcaciones involucradas en los proyectos, minimizando el riesgo de colisión con fauna marina y reduciendo el ruido subacuático.
- j) **Estudios de línea de base:** Se recomienda llevar a cabo estudios de línea de base de fauna detallados, con muestreos de al menos 4 campañas anuales (una por cada estación) para establecer un punto de referencia claro y detallado del entorno marino antes de la instalación de parques eólicos. Este enfoque permite una evaluación precisa de los impactos ambientales y la implementación de medidas de mitigación efectivas.
- k) **Identificar zonas de densa migración de aves:** Se recomienda evitar la ubicación de proyectos en zonas con alta densidad de migración, como áreas cercanas a la costa o corredores migratorios. Esto incluye la alineación de los aerogeneradores en filas paralelas a la dirección principal de migración y la creación de corredores de migración de varios kilómetros de ancho entre los parques eólicos (Julia Köller, 2006, pág. 113).

Medidas para impactos sobre el Medio Físico:

- a) **Contención y Prevención de Derrames:** Exigir a los proveedores de servicios de estudios y operadores y dueños de embarcaciones contar con sistemas de contención para prevenir derrames de combustible y otros contaminantes. Esto incluye barreras físicas, planes de respuesta rápida y equipos especializados para la limpieza inmediata en caso de un incidente.
- b) **Control de Emisiones de Embarcaciones:** Aplicar tecnologías de reducción de emisiones en las embarcaciones, como filtros de partículas, catalizadores, entre otros.
- c) **Optimización de Operaciones:** Planificar y optimizar las rutas de navegación y las operaciones para minimizar el tiempo de funcionamiento de motores y maquinaria, reduciendo así las emisiones generales.

Medidas para impactos sobre el Medio Antrópico:

- a) **Planificación de tráfico marítimo:** Establecer rutas de navegación y velocidades máximas para las embarcaciones involucradas en los proyectos, minimizando el riesgo de colisión con fauna marina y reduciendo el ruido subacuático.

10.2. Fase de construcción

La construcción de un proyecto en el área delimitada de la ZEE conllevará una serie de impactos ambientales significativos. A continuación, en la Figura 60 se presentan los 15 principales impactos identificados en la sección 8.2 Fase de construcción, junto con los medios y factores ambientales que serán más impactados para la ZEE.

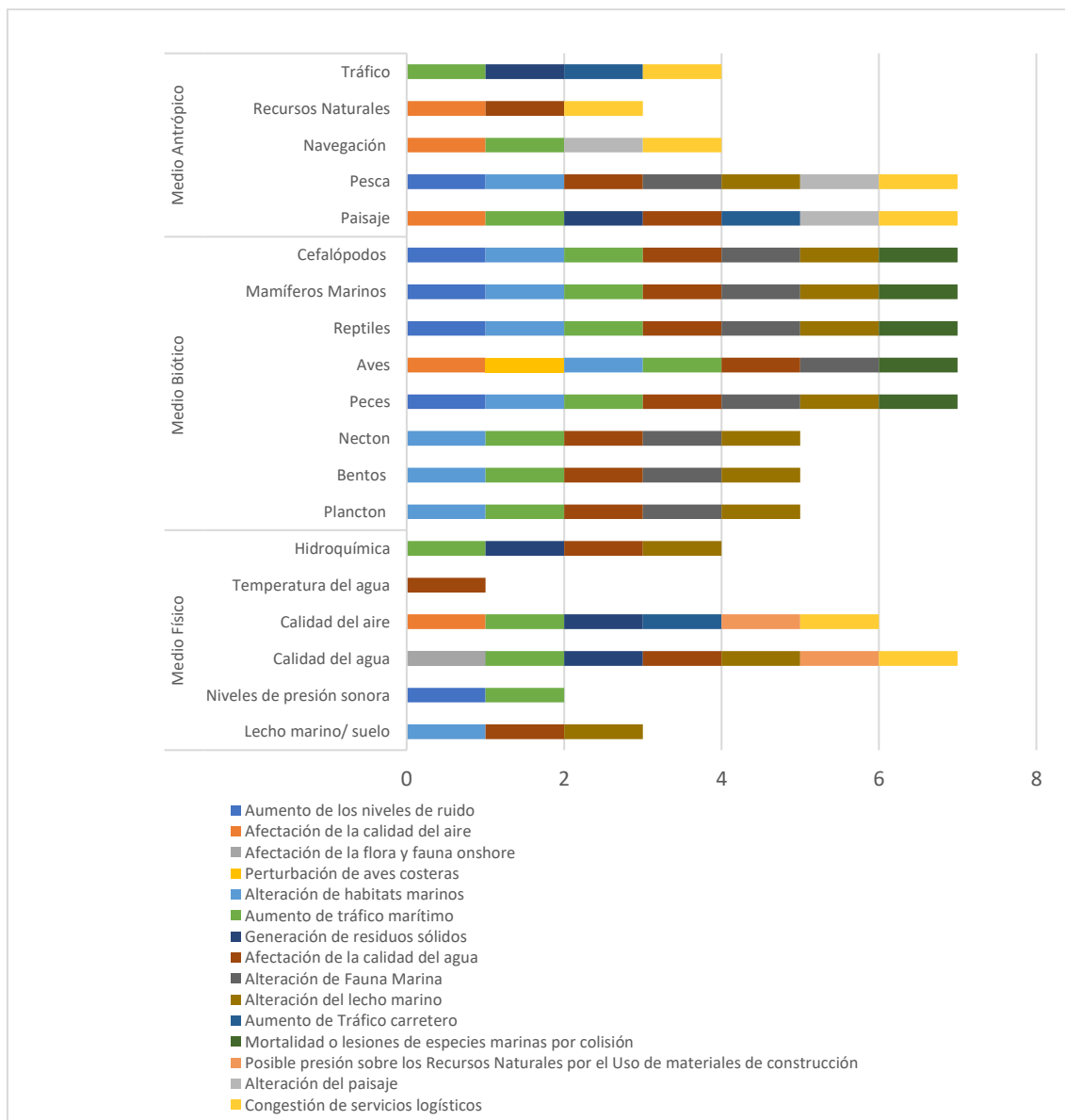


Figura 60. Principales impactos ambientales identificados durante la fase de construcción para la ZEE.

En el análisis hecho en la sección 8, el medio con mayor afectación resultó ser el Físico, sin embargo, en general los factores más afectados durante la etapa de construcción son los que están relacionados con la fauna marina, principalmente los peces, los cefalópodos, el plancton, los bentos, el necton, peces, los reptiles y los mamíferos marinos. Estos componentes del medio biótico sufren perturbaciones significativas debido a la alteración de hábitats, el aumento en los niveles de ruidos, la calidad del agua y del aire y la colisión con estructuras marinas.

El consumo de recursos naturales, la navegación, el paisaje, el lecho marino/suelo, las aves, los niveles de presión sonora y el tráfico también presentan un alto nivel de afectación. De acuerdo con estos resultados, las medidas a implementar deben estar fuertemente enfocadas en proteger tanto la biodiversidad marina como la calidad de los recursos naturales de la zona.

10.2.1. Aumento de los niveles de Ruido, Alteración de la Fauna Marina, Alteración de los hábitats marinos, Mortalidad o lesiones de especies marinas y aves por colisión

Durante la fase de construcción de los proyectos los principales impactos ambientales están relacionados con el aumento de los niveles de ruido y la alteración de la fauna marina; esta etapa puede durar de uno a tres años (T. Aran Mooney, 2020, pág. 83) y puede afectar especialmente mamíferos marinos como delfines, ballenas y lobos marinos que se encuentran dentro de la ZEE.

Las actividades de construcción generan diversas fuentes de ruido que pueden tener impactos significativos en los ecosistemas marinos. Principalmente la etapa de instalación de fundaciones es una de las actividades más significativas en la generación de ruido, generalmente realizada con martillos hidráulicos o percutores vibratorios usados para las fundaciones de tipo monopilote. El contacto de la pila con el agua y el golpe del martillo sobre la pila crean ondas acústicas que se propagan desde la pila a través de la columna de agua y el sustrato por múltiples caminos, resultando en sonidos fuertes, de alta energía, impulsivos y con tiempos de subida abruptos (T. Aran Mooney, 2020, pág. 88). Algunas especies de ballena y el delfín son particularmente sensibles al ruido debido a su dependencia del sonido para la navegación, la búsqueda de alimento y la comunicación.

Se considera que las emisiones de ruido durante la instalación de estructuras basadas en gravedad y cubos de succión son pequeñas en comparación con los martillos hidráulicos (T. Aran Mooney, 2020, pág. 88), pero se necesita más información para confirmar esta afirmación.

Además del ruido generado por la instalación de las fundaciones, hay muchas otras fuentes de ruido asociadas con las actividades de construcción, incluyendo los movimientos de los barcos, el dragado, la perforación y el corte con chorros de agua. Estos ruidos pueden afectar a una variedad de especies marinas, ocasionando los mismos efectos que se explicaron en el apartado anterior, causando lesiones físicas, como daño a los tejidos auditivos y otros órganos en los peces. También puede inducir respuestas de estrés fisiológico, cambios en el comportamiento de natación y tasas de ventilación. Los efectos varían según la especie y la intensidad del ruido (T. Aran Mooney, 2020, pág. 89).

Las colisiones de especies con embarcaciones representan un peligro significativo para vertebrados marinos, como tortugas, delfines, ballenas y lobos marinos. Se estima que estos peligros aumenten debido al continuo tráfico de embarcaciones. Además, la fauna más pequeña, incluyendo rayas y especies de aves nadadoras, también está en riesgo. Las colisiones a menudo resultan en lesiones profundas provocadas por el contacto con las hélices, así como en lesiones internas o la muerte debido a golpes directos con las proas o cascos de los barcos. La velocidad de la embarcación es un factor crucial que determina la gravedad de una colisión, y también influye en los tipos y la eficacia de las estrategias de evasión adoptadas por los animales (Byrnes & Dunn, 2020, pág. 6).

Medidas y recomendaciones:

- a) **Uso de pingers:** Antes de comenzar a hincar las pilas, se colocan dispositivos acústicos especiales que emiten un sonido fuerte para disuadir a los mamíferos marinos de entrar en la zona de construcción. Esto ayuda a evitar daños a los

oídos de los mamíferos marinos y a prevenir lesiones permanentes (Thomsen, 2012, pág. 286).

- b) **Uso de cortinas de burbujas:** Esta técnica implica el uso de un tubo de plástico perforado por el que se hace pasar aire presurizado para crear burbujas. Estas burbujas ayudan a reducir el nivel de ruido bajo el agua, aunque su eficiencia puede verse afectada por el movimiento del agua y la expansión de las burbujas a medida que suben a la superficie (Thomsen, 2012, pág. 288).
- c) **Sistemas de propulsión a chorro:** Se ha detectado que usar sistemas de propulsión a chorro en lugar de hélices tradicionales en motores fuera de borda, reduce las lesiones y muertes de las tortugas marinas (y posiblemente de otras especies acuáticas) (Byrnes & Dunn, 2020, pág. 26).

10.2.2. Afectación de la calidad del aire, Afectación de la calidad del agua y Alteración de Lecho Marino

Las descargas operativas y accidentales procedentes de actividades de navegación y transporte marítimo, como el agua de lastre y de sentina, pueden introducir contaminantes y especies invasoras en los ecosistemas marinos, alterando el equilibrio natural. La eliminación inadecuada de basura y aguas residuales de los buques puede introducir patógenos y nutrientes en el medio marino, contribuyendo a la contaminación del agua y a posibles riesgos para la salud de las especies marinas (Byrnes & Dunn, 2020, pág. 3).

Las actividades de construcción pueden llevar a la liberación de sedimentos, suspensión de sedimentos que aumentan la turbidez y contaminantes en el agua, afectando su calidad. El dragado, la excavación y los derrames accidentales de combustibles y productos químicos pueden aumentar la turbidez del agua y liberar sustancias nocivas, perjudicando a los organismos acuáticos y alterando los ecosistemas marinos.

La instalación de las estructuras offshore puede inducir cambios locales en la hidrodinámica y el transporte de sedimentos, afectando la turbidez y alterando la dinámica de sedimentos de grano fino y el esfuerzo cortante del lecho. Estos cambios influyen en la producción biológica primaria y secundaria dentro de la columna de agua hasta los niveles tróficos superiores. Dependiendo de los patrones hidrodinámicos dominantes, podría ocurrir un cambio en las especies bentónicas (Van Hoey, 2018, pág. 61). Además, la perturbación del lecho marino durante el tendido de cables puede causar la resuspensión de sedimentos y afectar la calidad del agua (Thomsen, 2012, pág. 285).

La destrucción del lecho marino por el aumento de embarcaciones en la zona afecta directamente el hábitat físico y la vegetación a través de daños por las anclas, encallamientos y lavados de embarcaciones (Byrnes & Dunn, 2020, pág. 3). Especies como los poliquetos y equinodermos como los erizos y estrellas de mar pueden ser impactados por la alteración de los hábitats bentónicos, además los poliquetos y crustáceos que viven en el fondo marino serán directamente afectados por la destrucción o alteración de su hábitat.

Las actividades de mantenimiento de embarcaciones y estructuras, tales como la aplicación de pinturas antifouling (tipo de pintura especializada que se aplica en cascos de barcos para prevenir el crecimiento de organismos marinos, como algas, crustáceos

y moluscos) puede alterar las propiedades fisicoquímicas de la columna de agua y afectar a la biota acuática (Byrnes & Dunn, 2020, pág. 5).

La construcción de los aerogeneradores y la instalación de capas de protección contra la erosión desplazan los sedimentos marinos, lo que altera la biodiversidad local y aumenta la suspensión de sedimentos, afectando la claridad del agua y potencialmente perjudicando a las especies bentónicas (Van Hoey, 2018, pág. 12), ya que el aumento de la turbidez del agua puede reducir la penetración de la luz, afectando la fotosíntesis del fitoplancton y, por ende, la base de la cadena alimentaria marina. Además, este cambio en el ecosistema local puede afectar las actividades de aves marinas como el Petrel de barba blanca o los albatros, que se identificaron en todas las regiones de la ZEE.

La construcción de canales para el tendido de cables submarinos puede tener efectos graves sobre la vida bentónica en el sitio. Los cables se entierran utilizando un arado a una profundidad de 1 a 1.5 metros en el lecho marino. Esto tiene serios efectos sobre la vida bentónica en el área (Thomsen, 2012, pág. 286), afectando a especies como los poliquetos y equinodermos presentes en la ZEE.

Tal como se mencionó en el resumen de Köller (2006) en la sección 7.1, *“La cobertura de fondos arenosos probablemente eliminará especies dependientes de hábitats blandos y favorecerá a la fauna de fondos duros y a grandes depredadores”*, cabe resaltar que en la plataforma predominan los hábitats de sustrato blando no vegetado, con comunidades de macrofauna bentónica, como se mencionó en la sección 9.2.2, por lo que los hábitats para estas especies se pueden ver fuertemente afectados.

Las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos provienen principalmente del uso de maquinaria pesada, equipos de soldadura y vehículos de transporte. Estas emisiones de NO_x, SO_x y CO₂ de motores y generadores utilizados en la construcción. La medición de estas emisiones puede ser complicada, especialmente para trabajos imprevistos como el uso de sopletes de soldadura o pruebas de motores en subestaciones offshore, contribuyendo a la contaminación y afectando la salud humana y la biodiversidad local (Thomsen, 2012, pág. 281).

Medidas y recomendaciones sobre la afectación de la calidad del agua

- a) **Medidas de Contingencia y Respuesta Rápida:** Implementación de planes de contingencia para abordar derrames de aceite y otras sustancias contaminantes de los equipos de instalación y mantenimiento. Evitar el uso de generadores y otros equipos temporales que pueden causar contaminación si no están conectados adecuadamente a la red eléctrica. En situaciones donde los aerogeneradores necesitan estar conectados a generadores temporales, es esencial seguir procedimientos específicos para evitar el derrame de combustible y otros contaminantes en el agua (Thomsen, 2012, pág. 282).
- b) **Mitigación de la Perturbación del Fondo Marino:** Minimizar la perturbación del lecho marino mediante técnicas adecuadas y planificadas de instalación de cables y otras estructuras submarinas (Thomsen, 2012, pág. 282). Diseñar el proyecto optimizando el trazado de cables y seleccionando las zonas de menor afectación para su instalación.
- c) **Selección de Materiales No Contaminantes:** Uso de materiales de cable que no liberan sustancias tóxicas al medio marino, como evitar cables con

aislamiento de hidrocarburos. Esto asegura que no se liberen compuestos tóxicos al agua, como el cloro y bromo producidos por algunos electrodos marinos, protegiendo la fauna y flora marina de la exposición a estos contaminantes (Bastien Taorminaa, 2018, pág. 384).

- d) **Planificación de las actividades de construcción:** Considerar los impactos acumulativos de todos los proyectos que se estén construyendo al mismo tiempo, para planificar las temporadas de construcción y evitar un sobre impacto en la zona.

Medidas y recomendaciones sobre la Afectación de la Calidad del Aire

- e) **Monitoreo y Documentación de Emisiones:** Garantizar que se establezcan planes de monitoreo continuo y recolección de datos sobre las emisiones de gases contaminantes durante todo el proceso de construcción y operación, permitiendo identificar cualquier desviación en las emisiones planificadas y tomar medidas correctivas de manera oportuna. Este monitoreo asegura que las emisiones sean gestionadas de acuerdo con los planes establecidos y las regulaciones ambientales.
- f) **Uso de Equipos y Tecnologías Limpias:** Implementación de equipos y tecnologías que minimicen las emisiones de gases contaminantes.

Medidas y recomendaciones sobre la Alteración del lecho marino

- g) **Planificación de la ruta del cable:** Selección de rutas de cable que eviten hábitats sensibles, como áreas de alta biodiversidad bentónica. Esta planificación reduce el riesgo de daños físicos y químicos directos a los hábitats marinos y ayuda a conservar las especies que dependen de estos ecosistemas. Al evitar áreas críticas, se minimiza la perturbación del fondo marino y se protege la estructura y función del ecosistema bentónico (Bastien, y otros, 2018, pág. 388).
- h) **Profundidad de enterramiento del cable:** Enterramiento de cables a profundidades adecuadas para minimizar la exposición de especies sensibles a campos electromagnéticos y emisión de calor. Al aumentar la distancia física entre los cables y las especies marinas, se reduce significativamente la intensidad de los campos electromagnéticos y el calor, lo cual puede afectar negativamente a organismos sensibles como elasmobranchios (tiburones y rayas) y peces diádromos. Enterrar los cables también protege los cables mismos de posibles daños y reduce las probabilidades de interacción negativa con la vida marina (Bastien, y otros, 2018, pág. 386).
- i) **Uso de Sistemas de Protección y Amarre Dinámicos:** Implementación de configuraciones adecuadas para reducir el riesgo de enredo de megafauna marina con los cables y líneas de amarre. Esto incluye el uso de cables de mayor diámetro y materiales que sean visibles para la fauna marina, así como la tensión adecuada en los cables para evitar la formación de lazos o enredos (Bastien, y otros, 2018, pág. 386).

10.2.3. Afectación de las Actividades Pesqueras, Aumento del Tráfico Marítimo y Aumento del Tráfico Carretero

Las actividades de construcción y el aumento del tráfico marítimo pueden interferir con las actividades pesqueras en la zona. Las restricciones de acceso y la perturbación de

los hábitats marinos pueden afectar negativamente a los pescadores locales, reduciendo sus capturas y afectando sus medios de vida.

La construcción puede alterar las condiciones hidrográficas locales, influyendo en la dispersión de larvas, juveniles y adultos, así como en la producción primaria y secundaria en la columna de agua, afectando así a las comunidades del fondo marino (Van Hoey, 2018, pág. 13). Estos efectos destacan la importancia de una planificación cuidadosa y la implementación de estrategias de mitigación para minimizar los impactos ambientales durante la fase de construcción de los proyectos.

Especies como la corvina (*Micropogonias furnieri*) y la merluza (*Merluccius hubbsi*) pueden experimentar estrés, cambios en el comportamiento de alimentación y reproducción, y desplazamiento de sus hábitats habituales debido al incremento de ruido.

El aumento en el tráfico marítimo debido al transporte de materiales, equipos y personal hacia y desde el sitio de construcción puede generar varios impactos ambientales. Este incremento puede aumentar el riesgo de colisiones entre embarcaciones, causar perturbaciones acústicas y alterar los patrones de navegación de la fauna marina, además de interferir con otras actividades marítimas como la pesca y el transporte comercial. La coordinación del tráfico es crucial para evitar colisiones y asegurar que todos los barcos involucrados en la operación logística puedan maniobrar adecuadamente. Esto incluye la vigilancia por radar y sistemas de comunicación por VHF para coordinar el flujo de personal y equipos (Thomsen, 2012, pág. 150).

Además, las restricciones de tránsito que puedan existir pueden afectar los sectores de pesca y de tránsito de la zona. Por ejemplo, en la Unión Europea durante la fase de construcción de los parques eólicos se implementan varias restricciones de tráfico para garantizar la seguridad. En general, la navegación está prohibida dentro de una zona de seguridad de 500 metros alrededor de las instalaciones durante la construcción. Estas restricciones varían entre los diferentes países miembros de la UE, pero comúnmente incluyen la prohibición de la navegación y, en algunos casos, de la pesca dentro de estas zonas de seguridad. Por ejemplo, en Dinamarca y Alemania, se prohíbe la navegación dentro de esta zona durante la construcción, mientras que, en el Reino Unido, además de las restricciones de navegación durante la construcción, también se pueden establecer zonas de seguridad permanentes alrededor de cada pilar del aerogenerador (Van Hoey, 2018, pág. 23).

Medidas de mitigación y recomendaciones

- a) **Involucrar al sector pesquero en el proceso de planificación:** Esta cooperación facilita la minimización de conflictos entre los desarrolladores de parques eólicos y los pescadores, asegurando que las actividades de pesca puedan continuar con el menor impacto posible (Van Hoey, 2018, pág. 61). Considerar en el diseño la posibilidad de establecer espaciamiento adecuado entre los aerogeneradores (800 m a 1000 m) para permitir la continuidad de la actividad pesquera y minimizar las perturbaciones, facilitando la coexistencia segura entre los parques eólicos y las operaciones de pesca comercial (Van Hoey, 2018, pág. 62).
- b) **Restricciones de Navegación y Zonas de Seguridad:** Establecer restricciones de navegación en una zona de seguridad alrededor del sitio de construcción para

minimizar el riesgo de colisiones y otras perturbaciones relacionadas con el tráfico marino, protegiendo tanto a los trabajadores como a la fauna marina cercana.

- c) **Prohibición de la Pesca con Redes de Arrastre Durante la Construcción:** Establecer regulación para la prohibición de la pesca con redes de arrastre en las zonas de construcción, de esta manera se puede evitar la perturbación de la fauna bentónica, reduciendo la resuspensión de sedimentos. Esto mantendrá la integridad del hábitat durante las actividades de construcción y protegerá el cableado submarino del proyecto (Van Hoey, 2018, pág. 41).

10.2.4. Generación de Residuos, Posible presión sobre los Recursos Naturales, Congestión de servicios logísticos y Alteración del paisaje

La construcción genera una cantidad considerable de residuos, incluyendo materiales de embalaje, desechos de construcción y residuos peligrosos. Además, también se deben gestionar los residuos generados durante la construcción, como restos de materiales de construcción y desechos de los trabajadores en el sitio. Los aceites y lubricantes usados o los posibles derrames de aceites y lubricantes utilizados en maquinaria y equipos de construcción deben ser manejados correctamente. La logística de transportar y almacenar residuos voluminosos de gran tamaño, como las fundaciones de los aerogeneradores, que pueden requerir áreas de almacenamiento extensas y equipos especializados para su manejo (Thomsen, 2012, pág. 279).

La construcción de proyectos puede aumentar la demanda de servicios logísticos en puertos y áreas de almacenamiento. La intensificación del tráfico vehicular y marítimo puede interferir con otras actividades industriales y comerciales, causando demoras y aumentando el riesgo de accidentes. La elección de un buen o mal puerto tiene un impacto significativo en el proyecto. Un puerto con un diseño y accesos ideales puede reducir el tiempo de instalación, mientras que un puerto pequeño con acceso deficiente puede complicar y ralentizar el suministro de componentes, lo que afecta negativamente toda la operación logística (Thomsen, 2012, pág. 224). Tal como se mencionó en la sección 4.7, para proyectos de este tipo podría llegar a necesitarse un área de puerto de preparación de alrededor de 60,000 a 70,000 m². También se mencionó que el Puerto de Montevideo tiene aproximadamente 1.000.000 m² de superficie, área que actualmente está ocupada por las actividades locales, por lo que será necesario identificar la ubicación del futuro puerto de servicio.

La elección de la ubicación del puerto tendrá un impacto significativo sobre el paisaje, ya que la zona costera de Uruguay que está frente a la ZEE es una zona con alto valor turístico para la población, por lo que la ubicación del puerto podría afectar y generar rechazo de comunidades.

El transporte de materiales y equipos a los sitios de construcción puede aumentar el tráfico de vehículos en las carreteras cercanas. Esto puede provocar congestión, aumentar el riesgo de accidentes y contribuir a la contaminación del aire en áreas urbanas y rurales.

La construcción de parques eólicos offshore requiere una cantidad significativa de recursos naturales, como concreto, acero, agua y energía. El uso intensivo de estos recursos puede tener implicaciones ambientales y económicas, destacando la

necesidad de una gestión sostenible de los materiales y la energía utilizados en el proceso de construcción.

Medidas de mitigación y recomendaciones

- a) **Sistema de gestión de residuos:** Todos los residuos generados durante la construcción deben ser recolectados y procesados adecuadamente. Esto incluye el desarrollo de sistemas para medir el peso de los residuos y asegurarse de que sean reciclados o eliminados correctamente (Thomsen, 2012, pág. 281). Por ejemplo, en aguas alemanas, se aplica el principio de cero descargas, lo que significa que todo lo que no quede fijo a la fundación debe regresar a tierra. Esto incluye cajas de cartón, lastre y aguas grises de los barcos, asegurando que no haya contaminación (Thomsen, 2012, pág. 42.).
- a) **Selección de un Puerto Adecuado:** Elegir un puerto con un diseño y accesos adecuados que faciliten la entrada y salida de componentes de manera eficiente. Un puerto bien diseñado reduce el tiempo de instalación y facilita el suministro continuo de componentes, mientras que un puerto pequeño con acceso deficiente puede complicar y ralentizar la logística, afectando negativamente toda la operación. (Thomsen, 2012, pág. 223). El puerto de Montevideo podría no ser una opción viable debido al espacio requerido, sin embargo, se debe evaluar y planificar muy bien su capacidad para atender este tipo de proyectos.
- b) **Planificación y Diseño de la Zona de Almacenamiento:** Establecer áreas de almacenamiento suficientemente grandes para manejar todos los componentes necesarios sin causar congestión. Como ejemplo, la zona de almacenamiento debe ser de alrededor de 60.000 a 70.000 metros cuadrados para un parque eólico de 80 aerogeneradores, asegurando que los componentes se puedan almacenar y preparar sin causar demoras logísticas (Thomsen, 2012, pág. 222). Además, deben tomarse en cuenta todos los componentes de la planta de electrólisis.
Esta zona de almacenamiento, y que también puede prestar servicios portuarios, debe ser seleccionada tomando en cuenta los puntos de interés turísticos y zonas costeras protegidas, para evitar crear conflictos con las comunidades.
- c) **Uso de Sistemas de Coordinación del Tráfico:** Implementación de un centro de coordinación para controlar y supervisar el tráfico en el puerto, en el camino y en el sitio de construcción offshore. Este grupo de vigilancia coordina el transporte de personal, barcos y equipos las 24 horas del día, los 7 días de la semana, evitando congestiones y asegurando un flujo logístico eficiente (Thomsen, 2012, pág. 150).
- a) **Minimización del Uso de Combustible y Lubricantes:** Asegurar el uso eficiente de combustibles y lubricantes durante las actividades de instalación y operación. La cantidad de combustible y lubricantes utilizados se calcula y se gestiona para asegurar que se consuma la menor cantidad posible para cada megavatio de energía instalada. Esta medida es crucial para reducir la huella de carbono y el impacto ambiental asociado con el uso de combustibles fósiles.
- b) **Documentación y Monitoreo de Consumo:** Función: Monitorear y documentar el consumo de recursos naturales, combustibles y materiales de construcción. Esta documentación es crucial para evaluar el impacto ambiental y mejorar las prácticas de gestión de recursos. Los datos recolectados se utilizan para cumplir con las normativas y para informar a las autoridades y partes interesadas sobre las prácticas de consumo de recursos (Thomsen, 2012, pág. 282).

10.3. Fase de Operación

A continuación, en la Figura 61 se presentan los 15 principales impactos identificados en la sección 8.3, junto con los elementos del ecosistema que serán más impactados para la ZEE,

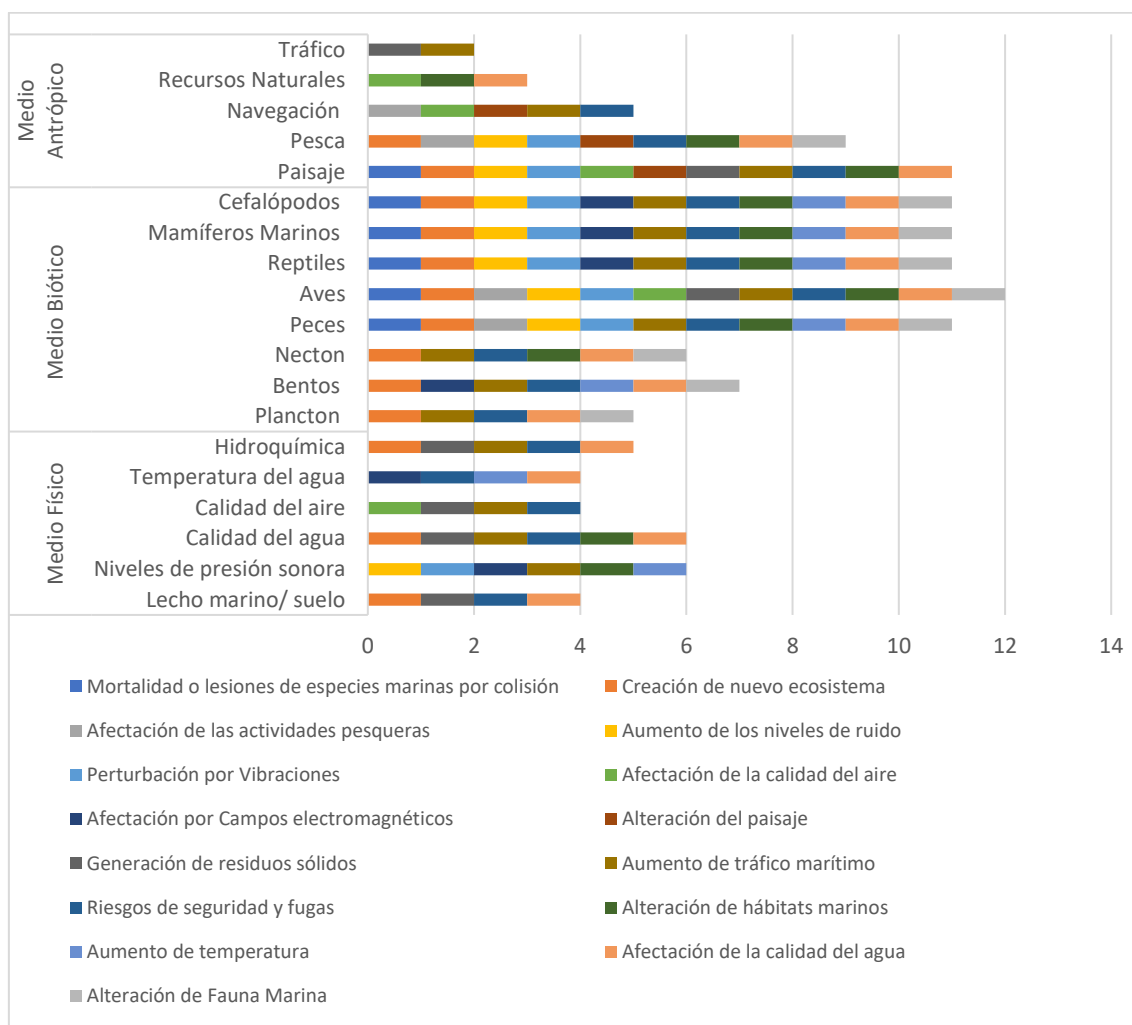


Figura 61. Principales impactos ambientales identificados durante la fase de operación para la ZEE.

Durante la fase de operación, las aves están dentro de los factores ambientales más significativos en el proyecto. El impacto más significativo sobre este factor es la mortalidad o lesiones de aves por colisión, que se produce debido a la interacción de las aves con los aerogeneradores. Además, otros impactos relevantes que afectan a las aves incluyen el aumento de los niveles de ruido y la afectación de la calidad del agua.

Otros factores ambientales relevantes incluyen los identificados dentro del medio biótico, que también sufren considerablemente debido a la mortalidad o lesiones de especies marinas por colisión y la perturbación de sus hábitats por las vibraciones ocasionadas durante la operación de los equipos.

El aumento del tráfico marítimo y la generación de residuos líquidos de las plantas de desalinización y generación de residuos sólidos son otros impactos significativos que afectan a múltiples factores ambientales, incluyendo la calidad del agua y los recursos naturales.

10.3.1. Mortalidad o lesiones de aves y especies marinas por colisiones y Alteración de Fauna Marina

La mortalidad por colisión y el desplazamiento de aves son los principales impactos negativos detectados sobre las aves durante la etapa de operación del parque eólico offshore. Algunos estudios mencionan que es probable que el riesgo de colisión de aves en el mar sea mayor que en tierra, ya que los aerogeneradores offshore serán considerablemente más altos y las palas del rotor más largas, lo que resultará en velocidades de punta significativamente mayores y mayor turbulencia. Además, la percepción acústica de las aves se verá obstaculizada por el ruido de fondo de las olas y el viento (Exo et al., 2003, pág. 2). Las aves pueden cambiar sus patrones de distribución y comportamiento para evitar los proyectos (Ibon, et al., 2022, pág. 5). Algunos estudios han demostrado además que los parques eólicos pueden afectar indirectamente a un área de impacto de aves mucho mayor al área del proyecto. En hábitats terrestres, la cantidad de aves que descansan y/o se alimentan disminuye alrededor de los aerogeneradores hasta un radio de 800 m, dependiendo de la especie (Exo et al., 2003, pág. 3).

Los aerogeneradores pueden actuar como barreras que afectan la migración de aves, lo que puede aumentar los costos energéticos de vuelo y, potencialmente, impactar la tasa de mortalidad y el tamaño de la población de aves migratorias. (Köller, 2006, pág. 36). Además, la presencia de los aerogeneradores y la infraestructura asociada al proyecto en general puede resultar en la pérdida de hábitat para las aves que usan estas áreas para descansar y alimentarse. Esto puede llevar a una disminución en la disponibilidad de hábitat adecuado para ciertas especies de aves marinas.

En la sección 9.2.5 se mencionaron las aves con mayor abundancia en la ZEE. Además, se presentó una indicación de su distribución a lo largo de la ZEE y su grado de protección a nivel nacional. Aunque el área con mayor número de avistamientos está fuera del área seleccionada como "factible" para el proyecto, se mencionó que las aves están distribuidas a lo largo de toda la extensión de la ZEE. Por lo tanto, se requieren estudios más detallados para identificar el comportamiento de las aves en el área del posible proyecto, realizar un estudio de riesgo de colisión y asegurar que el área no se encuentre dentro de un corredor de aves migratorias.

En el caso de otros animales voladores, como los murciélagos, el estudio "*Kattegat West Baltic Bats Project*" que están llevando a cabo las compañías Vattenfall, Energinet, la Agencia Danesa de Energía, WSP, Pennen & Sværdet y EnviroPlanning (Vester, 2024) menciona que algunas especies de murciélagos se aventuran al mar en busca de alimento, mientras que otras migran largas distancias a través de aguas marinas. Señalan que una parte de la población de murciélagos de *Nathusius* migra desde Finlandia hasta Gran Bretaña, encontrándose en su ruta con parques eólicos offshore en el mar Báltico, los estrechos daneses y el mar del Norte, lo que podría aumentar el riesgo de colisiones con las palas de los aerogeneradores. Se necesita evaluar más

información sobre la existencia de murciélagos en la ZEE, ya que en la información consultada no se mencionan. Se deben realizar estudios para entender sus comportamientos, y así poder evaluar el impacto que pueden tener los proyectos eólicos offshore en los mamíferos alados de la zona (si es que los hubiera).

Las actividades de operación y mantenimiento de estos proyectos presentan diversos impactos para la fauna marina local, incluyendo mamíferos marinos, tortugas marinas, peces y aves. Las bases y estructuras de los aerogeneradores y otras infraestructuras marinas pueden representar un riesgo significativo de colisión o atrapamiento para mamíferos marinos como delfines y ballenas, así como para tortugas marinas identificadas en la zona como la tortuga cabezona (*Caretta caretta*) y la tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*). Estas colisiones pueden causar lesiones graves y afectar las poblaciones de estas especies, como se identificó en el resumen de la sección 7.1.

El aumento de los niveles de ruido y las vibraciones generados por la operación de aerogeneradores, electrolizadores y sistemas de compresión pueden tener efectos negativos significativos sobre la fauna (European Industrial Gases Association AISBL, 2018, pág. 3). Los mamíferos marinos, como las ballenas y delfines, y peces sensibles al sonido pueden experimentar alteraciones en su comportamiento y patrones de migración debido a estos ruidos subacuáticos. Las vibraciones también pueden afectar a otras especies marinas, alterando su comportamiento y causando estrés. La combinación de diferentes presiones (como el ruido submarino y las vibraciones) puede aumentar los impactos negativos en los ecosistemas marinos, aunque estos efectos acumulativos no están completamente investigados (Ibon et al., 2022, pág. 6).

La producción de campos electromagnéticos por los cables submarinos puede afectar a diversas especies marinas, aunque los datos sobre la sensibilidad y tolerancia de muchas de estas especies aún son limitados. Este impacto es una de las mayores preocupaciones debido a las incertidumbres científicas existentes (Bastien, y otros, 2018, pág. 386).

El aumento del tráfico marítimo, necesario para el transporte de materiales, equipos y personal, incrementa el riesgo de colisiones con fauna marina y puede afectar las rutas de migración de mamíferos y aves marinos, como el petrel de barba blanca y el albatros. Este tráfico intensificado puede también interferir con las actividades pesqueras tradicionales, afectando la captura de especies económicamente importantes como la merluza y la corvina que pueden darse en las zonas identificadas.

La calidad del agua en la ZEE de Uruguay puede verse comprometida por la liberación de sedimentos y contaminantes durante las actividades de operación. Esto puede perjudicar a los organismos acuáticos y alterar los ecosistemas marinos. Las especies bentónicas y los peces son particularmente vulnerables a estos cambios en la calidad del agua.

La navegación, el transporte marítimo y las operaciones asociadas de infraestructura portuaria y marina contribuyen a la contaminación lumínica artificial, alterando los colores naturales, los ciclos y las intensidades de la luz nocturna. Los impactos conocidos y potenciales de los cambios en los regímenes de luz ambiental incluyen: obstáculos para la navegación, migración y comunicación; supresión de la migración vertical diaria del zooplankton debido a la iluminación artificial; concentración de peces bajo luces, lo que conduce a una mayor depredación; colisiones nocturnas de aves con

estructuras iluminadas; alteración del reclutamiento y selección de sitios de larvas de invertebrados; y desplazamiento de las tortugas marinas y desorientación y aumento de la depredación de las crías (Byrnes & Dunn, 2020, pág. 15).

En el proceso de desalinización, uno de los principales impactos está relacionado con los sistemas de toma de agua en el mar, lo cual puede causar el atrapamiento contra las rejillas de la tubería de toma de agua o la succión hacia el sistema, atrapando organismos marinos (Thomas M. Missimera, 2017, pág. 198).

Como impacto positivo, las estructuras marinas tienen el potencial de actuar como arrecifes artificiales, proporcionando nuevos hábitats que pueden beneficiar a diversas especies, incluyendo invertebrados bentónicos como poliquetos y equinodermos, así como varias especies de peces de arrecife. Sin embargo, estos cambios pueden alterar las comunidades biológicas locales y modificar la biodiversidad natural del área (Ibon et al., 2022, pág. 5).

Medidas de mitigación y recomendaciones para los impactos relacionados con Aves y murciélagos

- a) **Equipos de Disuasión:** Se recomienda instalar equipos para disuadir a las aves y los murciélagos, ya sean disuasores auditivos y visuales, que intentan mantenerlos fuera de la zona de riesgo de las palas de los aerogeneradores. Los disuasores ultrasónicos, que crean frecuencias confusas para la ecolocación de murciélagos, han mostrado cierta efectividad en reducir la actividad y mortalidad de estos. Por otro lado, señales auditivas disuaden a aves. En cuanto a los disuasores visuales, se ha probado pintar una de las palas de negro para aumentar su visibilidad, reduciendo así las colisiones en un 70 % en estudios específicos (Renewable Energy Wildlife Institute, 2024).
- b) **Sistemas de reducción o apagado de aerogeneradores:** La reducción consiste en ajustar las palas de los aerogeneradores (alineándolas paralelamente al viento para ralentizarlas o detenerlas) cuando se determina que el riesgo de colisión es alto (Renewable Energy Wildlife Institute, 2024). Esta estrategia ha demostrado ser efectiva para reducir las muertes de murciélagos por colisión. También puede ser efectiva en algunos casos para evitar la mortalidad de aves grandes. El apagado selectivo de aerogeneradores con mayor riesgo puede reducir efectivamente las muertes de rapaces. En el sur de España, proyectos han logrado una reducción promedio de más del 50 % en muertes de buitres leonados mediante el apagado selectivo de aerogeneradores cuando se observan buitres cerca por observadores humanos (Renewable Energy Wildlife Institute, 2024).
Se recomienda también la instalación de un radar para la detección de aves cuando no hay un observador humano. Las tecnologías emergentes, como el aprendizaje automático y la inteligencia artificial, pueden ayudar a superar las limitaciones en la identificación de especies que puede tener el radar. También se está investigando el uso de telemetría para activar la reducción para especies vulnerables cerca de instalaciones eólicas (Renewable Energy Wildlife Institute, 2024).
- c) **Iluminación de los Aerogeneradores:** Se recomienda minimizar la iluminación continua de los aerogeneradores para reducir las colisiones de aves. En su lugar, se sugiere el uso de luces intermitentes con largos intervalos, ajustadas a las

condiciones meteorológicas. Durante noches con malas condiciones meteorológicas y alta intensidad de migración, se pueden apagar los aerogeneradores y ajustar las palas del rotor para minimizar su superficie relativa a la dirección principal de migración (Köller, 2006, pág. 114).

Medidas de mitigación y recomendaciones para los impactos relacionados con Fauna Marina

- a) **Colisiones:** Este punto ha sido tratado en la sección 10.2.1.
- b) **Planificación Espacial Marina:** Implementar procesos de planificación espacial marina para evaluar y gestionar de manera efectiva los impactos ambientales de los proyectos eólicos offshore, asignando espacios a las actividades de pesca, actividades energéticas u otras, y asegurando que las actividades se realicen sin comprometer la salud del océano ni la resiliencia de los ecosistemas marinos (Ibon et al, 2022, pág. 6).
- c) **Diseño de Tomas de Agua Subsuperficiales para proceso de desalinización:** Utilizar tomas de agua subsuperficiales puede reducir significativamente los impactos de atrapamiento o succión de organismos marinos durante el proceso de toma de agua para la desalinización. Estas tomas filtran naturalmente el agua y minimizan la entrada de organismos marinos. Se recomiendan siempre que sean técnica y económicamente viables (Thomas M. Missimera, 2017, pág. 212).
- d) **Uso de cables con tecnología adecuada:** Tal como se explicó en las medidas propuestas durante la fase de construcción, una medida para evitar el efecto consiste en enterrar los cables bajo el sedimento marino para reducir significativamente la exposición a los campos electromagnéticos. También se recomienda el uso de cables con tecnología adecuada como cables de corriente alterna trifásicos (CA) y sistemas de transmisión de corriente continua de alta tensión bipolar para minimizar la emisión de campos magnéticos. Además, un blindaje adecuado puede ayudar a minimizar la emisión de campos eléctricos generados directamente (Bastien, y otros, 2018, pág. 201).
- e) **Creación y Restauración de Hábitats:** Para mitigar los impactos, se puede crear zonas que aumenten las áreas de desove de peces e invertebrados. Esta medida compensa la pérdida de organismos marinos debido a las operaciones del proyecto. La implementación incluye la restauración de hábitats marinos y la repoblación de especies clave según datos de monitoreo ambiental (Thomas M. Missimera, 2017, pág. 200).
- f) **Control de iluminación con sensores de movimiento o temporizadores:** Para gestionar los impactos de la luz de las embarcaciones y estructuras en el medio marino, se pueden implementar medidas como el uso de protectores de luz o iluminación direccional para reducir la dispersión de la luz. El uso de sensores de movimiento o temporizadores para controlar la duración de la exposición a la luz puede ayudar a minimizar el impacto en la vida silvestre y los hábitats. Establecer regulaciones o pautas sobre la intensidad y el horario de la iluminación artificial cerca de cuerpos de agua también puede mitigar los efectos negativos de la luz excesiva en los entornos acuáticos (Byrnes & Dunn, 2020, pág. 18).

10.3.2. Afectación de la calidad del aire, Afectación de la calidad del agua, Generación de residuos líquidos y sólidos

La calidad del aire se ve afectada principalmente por las emisiones de los barcos de servicio y los equipos de mantenimiento. Estos gases contaminantes pueden degradar la calidad del aire local, contribuyendo a la contaminación atmosférica y afectando la salud del ecosistema.

Además, puede haber otras fuentes de afectación del aire, como los relacionados con las fugas de gases de H_2 durante el proceso de electrólisis, o en los sistemas de almacenamiento. Algunos científicos atmosféricos reportan que las emisiones de hidrógeno en la atmósfera afectan indirectamente el calentamiento global, tal como se mencionó en la Tabla 17, ya que el hidrógeno emitido es absorbido por el radical hidroxilo (OH), que es crucial para eliminar el metano de la atmósfera. Por lo tanto, un aumento en las emisiones de H_2 disminuirá las concentraciones promedio de OH y prolongará la vida atmosférica del metano.

Diversos estudios han mostrado una variabilidad significativa y han señalado la incertidumbre en la magnitud del efecto de calentamiento del H_2 emitido, así como una incertidumbre aún mayor en la magnitud de las fugas y emisiones de H_2 que podrían esperarse con una infraestructura de H_2 más desarrollada (Shaddix, 2022, pág. 3).

La generación de residuos líquidos en los proyectos está directamente relacionada con las operaciones de mantenimiento de los aerogeneradores, así como durante el proceso de electrólisis en las plantas de hidrógeno verde, ya que se producen diversos tipos de residuos líquidos que requieren una gestión adecuada para evitar impactos negativos. Durante el mantenimiento de estas estructuras, se generan residuos como lubricantes y desechos operacionales, que pueden ser peligrosos y deben ser manejados adecuadamente para evitar daños ambientales. En caso de daño a los cables eléctricos, existe la posibilidad de liberar materiales contaminantes que afectan la calidad del agua. Estos materiales pueden incluir metales pesados y otras sustancias tóxicas que impactan negativamente los ecosistemas marinos.

Uno de los principales residuos líquidos generados es la salmuera resultante del proceso de desalinización del agua, necesaria para proporcionar agua de alta pureza para los electrolizadores, como se explicó en la sección 5.8. La descarga de esta salmuera al mar puede aumentar la salinidad y densidad del agua receptora, lo que lleva a una mayor estratificación del agua y una reducción del intercambio de oxígeno en la columna de agua. Esto puede afectar negativamente a la biota marina, incluyendo la fauna bentónica y los peces (Thomas M. Missimera, 2017, pág. 211). Además, la utilización de cobre y otros metales en el sistema de desalinización puede incrementar la concentración de estos metales en el agua, aumentando su toxicidad. Dependiendo del sistema de operación, el proceso de desalinización requiere el uso de productos químicos, que pueden estar presentes en los residuos líquidos generados y descargados al ambiente.

La operación de los electrolizadores puede producir además una cantidad significativa de aguas residuales, las cuales pueden tener temperaturas altas y que deben ser tratadas adecuadamente para evitar impactos negativos en la calidad del agua marina (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ]; Ministerio de Energía de Chile, 2020, pág. 5). Como se mencionó en la Tabla 17, los electrolizadores PEM no

utilizan líquidos alcalinos o ácidos fuertes como en otras formas de electrólisis; sin embargo, la disposición de cualquier sustancia química utilizada en el mantenimiento de los equipos debe ser manejada cuidadosamente.

Durante el mantenimiento de los sistemas de electrólisis y los aerogeneradores, se generan otros residuos líquidos como aceites lubricantes, solventes y productos químicos utilizados en la limpieza de equipos. Estos residuos pueden contener sustancias tóxicas y deben ser manejados cuidadosamente para evitar su liberación al ambiente. La disposición inadecuada de estos residuos puede llevar a la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas, impactando los ecosistemas terrestres y acuáticos adyacentes.

La generación de residuos sólidos durante la fase de operación del parque eólico offshore se refiere principalmente a desechos de embalajes. Durante el proceso de electrólisis se producirán desechos de las membranas desgastadas o dañadas, que contienen metales preciosos como platino e iridio, siendo estos residuos especiales. Si su disposición no se maneja adecuadamente, pueden liberar estas sustancias al entorno.

Medidas de mitigación y recomendaciones para los impactos relacionados con la Calidad del Agua

- a) **Sistemas de difusión para descarga de concentrado de salmuera:** Los sistemas de difusores ayudan a mezclar rápidamente el concentrado salino con el agua marina, reduciendo la diferencia de densidad entre el agua de descarga y el agua receptora, minimizando los impactos locales de la alta salinidad y protegiendo los ecosistemas bentónicos.
Se recomienda el diseño de los sistemas de difusores basados en modelos de flujo y corrientes para asegurar una mezcla efectiva (Thomas M. Missimera, 2017, pág. 211).
Esta medida debe ser estudiada con detalle para su implementación en Uruguay, ya que las medidas de dilución de efluentes están prohibidas. El proceso de devolución de la salmuera podría implicar la instalación de un emisario por el que se realizaría la descarga de la salmuera, que significa la devolución de un componente que se encuentra en el mar, solo que a una concentración diferente y esto es lo que se debería regular a través de un proceso de dosificación.
- b) **Tratamiento de Aguas Residuales:** Es esencial tratar las aguas residuales generadas durante los procesos, en especial las aguas residuales de las embarcaciones y las operaciones de mantenimiento. Esto incluye la instalación de sistemas de tratamiento de aguas que puedan eliminar impurezas.
- c) **Gestión Segura de Productos Químicos:** Los productos químicos utilizados en el mantenimiento de los electrolizadores y aerogeneradores deben ser gestionados de acuerdo con las regulaciones ambientales. Esto incluye el almacenamiento adecuado, la manipulación segura y la disposición correcta de estos productos para evitar derrames y fugas que puedan contaminar el suelo y las aguas subterráneas.
- d) **Recuperación de elementos en la salmuera:** Utilizar técnicas conocidas como "minería de salmuera" o "brine mining", que consiste en la obtención de sales y productos químicos a partir de fluidos con alta concentración de sal. Esta técnica se utiliza principalmente para la producción de sal de mesa (Nuevo, 2020).

- e) **Monitoreo y Mitigación Ambiental:** Se recomienda además implementar medidas de seguimiento como el monitoreo continuo de los parámetros de calidad de agua permite ajustar las operaciones para minimizar los impactos en tiempo real. Esto incluye evaluaciones previas al diseño para entender las poblaciones de organismos marinos y el uso de medidas de mitigación como la creación de hábitats. Estas acciones permiten que las instalaciones de desalinización operen sin causar impactos significativos. (Thomas M. Missimera, 2017, pág. 211)

Medidas de mitigación y recomendaciones para los impactos relacionados con Calidad del Aire y Residuos sólidos

- f) Calidad del Aire: Este punto ha sido tratado en la sección 10.2.2
- g) Residuos sólidos: Este punto ha sido tratado en la sección 10.2.4

10.3.3. Posible presión sobre los recursos naturales

Sobre el impacto de posible presión sobre los recursos naturales, el principal enfoque estará en el consumo de agua del proceso de electrólisis. Tal como se mostró en la Tabla 11, el consumo promedio de agua durante el proceso de electrólisis puede estar entre 9-10 litros por cada kilogramo producido. Sin embargo, esta referencia es para agua desmineralizada. Considerando las condiciones de salinidad de la ZEE mencionadas en el apartado 9.1, esta zona tiene un contenido de salinidad en las aguas superficiales (de 0 a 100 metros) entre los rangos de 35-36 PSU, por lo que será necesario realizar un tratamiento de desalinización previo. Tal como se mencionó en el apartado 6.2.2, si el agua a utilizar durante el proceso contiene altos niveles de salinidad la eficiencia de consumo de agua disminuye en un 35 % por lo que el consumo de agua desde el origen será de aproximadamente 30 litros por cada kilogramo de hidrógeno.

Aunque los proyectos de hidrógeno consumen volúmenes significativos de agua, en general, la demanda de agua de la industria es solo una pequeña fracción del sector energético (IRENA & Bluerisk, 2023, pág. 55). Sin embargo, este factor puede cambiar en las zonas donde la escasez del agua sea un problema. Para el caso de un proyecto en la ZEE de Uruguay que contempla la utilización de agua directa del mar, no competiría con otras actividades que necesiten de agua dulce para su consumo. La electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM) es la tecnología de producción de hidrógeno verde menos intensiva en consumo agua (IRENA & Bluerisk, 2023, pág. 55).

Los procesos de enfriamiento de equipos durante la electrólisis y compresión pueden ser intensivos en el consumo de agua. Un proceso de producción más eficiente en energía resulta en una menor generación de calor residual, lo que lleva a una menor demanda de enfriamiento y, por lo tanto, reduce el consumo de agua (IRENA & Bluerisk, 2023, pág. 55)

Los materiales utilizados en los electrolizadores PEM, especialmente los catalizadores basados en platino, como se mencionó en el apartado 5.2, representan un consumo significativo de recursos naturales debido a su escasez y los impactos ambientales asociados con su minería. Además, las tecnologías PEM son más propensas a generar un mayor impacto ambiental por los materiales empleados durante su fabricación,

debido al uso de materiales derivados del Flúor para la membrana y uso de metales nobles (Heymo Ingeniería y Ariema, 2020, pág. 59).

Medidas de mitigación y recomendaciones para los impactos relacionados con Posible presión sobre los Recursos Naturales

- a) **Utilizar fuentes de agua que no compitan con otros sectores:** El agua de mar es una buena opción tanto para la producción de hidrógeno como para los procesos de enfriamiento, eliminando tanto el estrés sobre los recursos de agua dulce locales como su exposición a los riesgos relacionados con la escasez de agua que podrían interrumpir la producción. Para las regiones que tienen una extrema escasez de agua dulce, pero acceso abundante al océano, el agua de mar puede ser la única opción realista para estos procesos (IRENA & Bluerisk, 2023, pág. 57).
- b) **Mejorar los sistemas y eficiencia de los procesos:** Utilizar sistemas eficientes e invertir en el mejoramiento de equipos puede resultar en el menor consumo de recursos. IRENA (2023) menciona que por cada aumento de 1 % en la eficiencia de la electrólisis, los requisitos de extracción y consumo de agua para la producción de H₂ disminuyen aproximadamente un 2%. Esto se debe a que, para el mismo tipo de tecnología de producción de hidrógeno, cuanto más eficiente es el sistema en términos de energía, menos calor residual necesita ser transferido, ya que se requiere menos agua para la refrigeración (IRENA & Bluerisk, 2023, pág. 56).
- c) **Alternativas a catalizadores en base de platino:** se están investigando alternativas al platino, como catalizadores basados en metales no preciosos y compuestos de bajo costo que puedan ofrecer una actividad catalítica comparable. También se están desarrollando técnicas para reducir la cantidad de platino utilizado en los electrolizadores PEM, mejorando la eficiencia del uso del material y aumentando la vida útil de los catalizadores.
- d) **Soluciones para la recuperación de metales nobles:** Pueden emplearse tratamientos de recuperación de metales como el tratamiento hidrometalúrgico o piro-hidrometalúrgico para la recuperación de platino, iridio o rutenio en tecnología PEM (Heymo Ingeniería y Ariema, 2020, pág. 60).

10.3.4. Perturbación por Vibraciones, Aumento de los niveles de Ruidos y Afectación por Campos electromagnéticos

Durante el funcionamiento de los equipos necesarios para el proceso de electrólisis se pueden generar ruidos y vibraciones debido a la fricción y el movimiento repetitivo de sus componentes internos. Los sistemas de compresión, que incluyen compresores y válvulas de alta presión, generan vibraciones considerables debido a la naturaleza de su operación. La compresión de gas requiere movimientos rápidos y repetitivos de los pistones o turbinas dentro de los compresores, lo que resulta en ruido y vibraciones adicionales.

La operación continua de equipos puede producir golpes de muy baja frecuencia que pueden impactar a las aves migratorias y a las ballenas dentro del alcance de propagación de la energía infrasónica de los aerogeneradores (Stocker, 2023). Estos golpes infrasónicos están dentro del rango perceptivo de las aves migratorias y las

ballenas barbadas, las cuales utilizan sonidos infrasónicos y señales de presión barométrica para la navegación y las señales de migración. La instalación de cientos de aerogeneradores puede imponer impactos significativos en estas especies debido a la energía contenida en los golpes infrasónicos; sin embargo, es un impacto que debe ser mejor estudiado (Stocker, 2023).

Las mediciones muestran que los niveles de ruido de los aerogeneradores son generalmente 10-20 dB más bajos que el ruido de los barcos en el mismo rango de frecuencia, siendo la distancia a los aerogeneradores el factor más significativo que afecta los niveles de presión sonora, pero es de suma importancia considerar la contribución de ruido acumulativo (Jakob, 2022). De igual forma, se debe considerar que las emisiones sonoras de baja frecuencia pueden ser detectadas a kilómetros de distancia.

Otra emisión de ruido puede ser la causada por cables submarinos que generan vibraciones durante la operación, en especial los de corriente alterna de alto voltaje (HVAC) debido a la fuerza de Coulomb que ocurre entre los conductores (Bastien, y otros, 2018, pág. 385). En comparación con la fase de instalación de cables, este impacto es bajo, pero continuo porque ocurre durante toda la fase de operación.

Los campos electromagnéticos generados por cables submarinos durante su operación pueden tener impactos ecológicos significativos. Se dividen en campos eléctricos y magnéticos, cuya intensidad varía según el tipo de cable, la corriente y si están enterrados o no. Estos disminuyen rápidamente con la distancia del cable, pero pueden afectar a especies marinas sensibles, como peces cartilaginosos, peces óseos, mamíferos marinos, tortugas, moluscos y crustáceos, que utilizan el campo geomagnético de la tierra para orientación y migración (Bastien, y otros, 2018, pág. 386). Aunque los datos sobre invertebrados son limitados, algunos estudios sugieren impactos menores o no significativos.

Medidas de mitigación y recomendaciones para los impactos relacionados con perturbación por vibraciones y aumento de niveles de ruido

- a) Mantenimiento Planificado y Regular:** Realizar un mantenimiento regular y adecuado de todos los equipos de electrólisis y compresión. Esto no solo garantiza un funcionamiento óptimo, sino que también ayuda a identificar y corregir problemas que puedan causar ruido y vibraciones adicionales debido al desgaste de componentes internos.
- b) Aislamiento acústico y uso de amortiguadores:** Instalar materiales de aislamiento acústico alrededor de los equipos ruidosos, como compresores. Además, se recomienda el uso de cabinas insonorizadas especialmente diseñadas para encapsular equipos, lo que ayudará a mitigar el impacto acústico en el entorno inmediato. También se deben emplear montajes y soportes con amortiguadores de vibraciones. Estos dispositivos permiten que los equipos operen sin transferir excesivas vibraciones al suelo y estructuras adyacentes. Implementar barreras acústicas subacuáticas y tecnologías de mitigación infrasónica para reducir la propagación de ruidos de baja frecuencia generados por los aerogeneradores en el entorno marino. Se necesita buscar más información sobre medidas aplicables para este impacto.
- c) Evaluar impactos acumulativos:** Considerar la contribución de ruido acumulativo de los parques eólicos offshore en la planificación espacial marítima

y la evaluación ambiental estratégica. Esto podría implicar la coordinación de los tiempos de construcción, para evitar que múltiples proyectos se desarrollen simultáneamente en la misma área, reduciendo así el impacto acumulativo del ruido. Además, se podrían contemplar la modificación de rutas marítimas y la zonificación de áreas de exclusión para minimizar la exposición de la fauna marina al ruido.

Medidas de Mitigación y recomendaciones para los impactos relacionados con Campos electromagnéticos

- a) Utilizar tecnología de cables adecuada:** para reducir la emisión de campos magnéticos, como cables trifásicos AC y sistemas de transmisión HVDC bipolares, y minimizar la emisión de campos eléctricos directamente generados mediante un blindaje adecuado (Bastien, y otros, 2018, pág. 388).
- b) Priorizar la profundidad de enterramiento adecuada al tipo de lecho marino:** Para reducir la exposición de especies sensibles a campos electromagnéticos y emisión de calor, se puede aumentar la distancia física entre los animales y el cable. Según Bastien et al. (2018), el nivel del campo electromagnético en la interfaz del lecho marino con una profundidad de enterramiento de 2 m sería aproximadamente el 25 % de su valor inicial, frente al 60 % para una profundidad de 1 m.
- c) Planificación:** Planificar las instalaciones para reducir las conexiones eléctricas y limitar el número de cables de transmisión, en especial cuando se planifican varios proyectos eólicos en conjunto.

10.3.5. Creación de nuevos ecosistemas, Afectación de las actividades pesqueras, Aumento del tráfico marítimo y Riesgos de seguridad y fugas

Las fundaciones o cimientos introducidos cambiarán las características locales al proporcionar una superficie para la colonización y potencialmente actuar como un arrecife artificial, como se detalló en la sección 7.2. Los efectos de afectación en el lecho marino resultan en alta turbidez y aumento de la concentración de sedimentos suspendidos alrededor del aerogenerador, llevando a la remoción de sustratos, cambiando la morfología del hábitat y la composición de especies. Para contrarrestar esto, a menudo se instala una capa de protección contra la erosión, lo que lleva a un efecto de arrecife artificial. Estas estructuras son colonizadas por altas densidades de especies incrustantes, resultando en la presencia de especies como mejillones, anémonas y anfípodos (Van Hoey, 2018, pág. 3). Se asume que especies de peces óseos y otras especies de fauna marina aprovechan estas áreas localmente enriquecidas para actividades de alimentación y refugio alrededor de las estructuras. Estas agregaciones y los efectos combinados son conocidos como el efecto de arrecife artificial. En la ZEE, esto podría favorecer a especies como la merluza (*Merluccius hubbsi*), la merluza negra (*Dissostichus eleginoides*), y otras especies demersales que habitan áreas superpuestas con las operaciones de pesca de arrastre.

La operación de los proyectos eólicos offshore puede tener un fuerte impacto en el sector pesquero pues se implementarán restricciones a la pesca, en especial la que usa arrastre. En Europa la mayoría de los parques eólicos offshore están cerrados a la pesca

de arrastre (Van Hoey, 2018, pág. 14). Esto puede representar un impacto positivo pues estas áreas ofrecen una zona de refugio, ayudando a proteger las poblaciones de peces comerciales, apoyando a la explotación sostenible de arrecifes artificiales. Sin embargo, puede representar un impacto negativo en el sector pesquero uruguayo, pues como se detalló en la sección 9.3.1, la mayor parte de la actividad pesquera en Uruguay es pesca de arrastre y ocurre en el área del talud continental. Los pescadores podrían concentrar sus esfuerzos en zonas fuera del alcance de los proyectos y posiblemente afectar negativamente a otras especies de alto valor comercial.

Además, la reducción de áreas accesibles para la pesca de arrastre podría impactar negativamente a los pescadores artesanales e industriales, que podrían ver disminuidas sus capturas de especies clave como la corvina y la pescadilla.

La mayoría de los proyectos offshore, dependiendo del tamaño, contarán con cientos de aerogeneradores. Suponiendo que cada aerogenerador debe ser revisado al menos una vez al año más una o dos visitas adicionales por aerogenerador para solucionar problemas técnicos, puede haber actividades de navegación más o menos diarias dentro del área del proyecto, además de contemplar las actividades de operación en la planta de producción de hidrógeno, resultado en que las actividades de navegación asociadas con la operación y mantenimiento puedan crear incluso más perturbaciones que los propios aerogeneradores en funcionamiento (Exo et al., 2003, pág. 3).

El manejo y almacenamiento de hidrógeno conlleva riesgos de incendios o explosiones. Se deben implementar estrategias para minimizar y mitigar estos riesgos, incluyendo el diseño adecuado de instalaciones, procedimientos de seguridad y programas de capacitación (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ]; Ministerio de Energía de Chile, 2020, pág. 4).

Entre los principales factores de riesgo están su amplio rango de inflamabilidad en el aire, la alta velocidad de la llama y la baja energía mínima de ignición que pueden causar accidentes de incendio y explosión. Además, la fragilización del hidrógeno en los metales conduce a rupturas en el equipo y la formación de fugas (Ayşenur Öztürk Aydın, 2023).

Medidas de mitigación y recomendaciones para los impactos relacionados con Sector Pesquero

- a) **Promover estrategias de coexistencia:** Crear un plan de ordenación del espacio marítimo que considere la coexistencia de los proyectos eólicos offshore y pesquerías, prohibiendo la pesca de arrastre de fondo dentro de un radio definido, pero evaluando posibilidad de permitir técnicas de pesca pasiva y de tránsito bajo ciertas restricciones, para minimizar la pérdida de acceso total a las zonas de pesca (Van Hoey, 2018).
- b) **Promover el diálogo y participación ciudadana:** Realizar consultas con el sector pesquero desde las primeras etapas de planificación asegurando que comprendan cómo estos proyectos pueden influir en el proceso. Organizar reuniones presenciales entre los sectores.

Medidas de Mitigación y recomendaciones para los impactos relacionados con Riesgos y Seguridad

- a) **Establecer distancias de seguridad:** Si bien casi siempre es mejor prevenir o mitigar la fuga directamente, la distancia física con respecto a un peligro potencial puede brindar niveles adicionales de seguridad. Esta distancia dependerá de la cantidad de componentes, el tamaño de los tanques de almacenamiento, la temperatura y presión del fluido del sistema, la frecuencia de ocurrencia de fugas de los componentes, las probabilidades de ignición y las probabilidades de fatalidad. Se puede cuantificar el riesgo a diferentes distancias de una fuga del sistema (Chris LaFleur, 2023, pág. 531).
- b) **Implementar códigos y normas de seguridad:** Se deben implementar regulaciones a nivel nacional que establezcan criterios de seguridad para la producción y manejo de H₂. Con el surgimiento del hidrógeno como forma de almacenamiento de energía, los códigos y normativas existentes deben evaluarse y mejorarse para abordar las nuevas tecnologías y estrategias de implementación (Chris LaFleur, 2023, pág. 533).

10.3.6. Impactos en el Uso del Suelo y la Biodiversidad y Paisaje

Aunque los efectos sobre el uso de suelo onshore, afectación de la biodiversidad y afectación del paisaje no resultaron entre los más significativos durante la fase de operación, se incluirán por su importancia relativa y como base en las conclusiones.

En el caso de los proyectos de hidrógeno con la configuración de la planta de electrólisis en tierra, se puede requerir la utilización de instalaciones existentes o la creación de nuevas instalaciones en terrenos no desarrollados, lo cual puede tener impactos en el uso del suelo, la flora, la fauna y los sitios patrimoniales. Cada proyecto requiere investigaciones específicas para evaluar estos impactos. (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ]; Ministerio de Energía de Chile, 2020, pág. 4)

En el caso de la desalinización, existe el riesgo de contaminación de aguas subterráneas debido a posibles fugas de concentrado salino y químicos tratados que pueden ser perjudiciales. Aunque la zona marina de la ZEE no bordea directamente la costa, constituye un componente esencial del paisaje costero debido a sus efectos a larga distancia. La instalación de parques eólicos offshore puede afectar la atracción turística de los sitios costeros y, por lo tanto, degradar en cierta medida la experiencia recreativa.

Medidas de mitigación y recomendaciones para los impactos relacionados con Paisaje y Uso del Suelo y la Biodiversidad onshore

- a) **Planificación territorial:** Para mitigar los impactos en el uso de suelo onshore, es fundamental realizar estudios exhaustivos antes de la construcción, para evaluar los efectos en la flora y fauna onshore. Priorizar la utilización de zonas industriales e instalaciones existentes ayudará a minimizar la alteración de terrenos no desarrollados.
- b) **Estudios de impacto visual:** Realizar estudios de impacto visual es fundamental para comprender cómo afectarán al paisaje costero y a la atracción turística. Optar por diseños y ubicaciones que minimicen la visibilidad desde áreas turísticas clave ayudará a mitigar estos efectos (Letcher, 2017, pág. 479).

Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones Generales

11. Conclusiones

El hidrógeno verde se presenta como una opción superior desde el punto de vista de las emisiones atmosféricas en comparación con otros tipos de hidrógeno debido a su potencial para descarbonizar sectores clave de la economía.

La eficiencia de la generación de energía eólica depende de la calidad del recurso eólico disponible en una ubicación específica. A mayores alturas, los aerogeneradores logran captar mayor cantidad de energía cinética dadas las velocidades de viento más altas que se tienen a mayor altura en la capa límite atmosférica, por lo que es esperable obtener mayores factores de capacidad. La atenuación potencial que se tendría en el ciclo diario de estabilidad en la capa límite atmosférica redundaría en una producción más constante a lo largo del día. Los aerogeneradores más altos tienen palas más grandes, aunque presentan desafíos en cuanto a lograr costos de instalación y generación, lo que implica costos de energía menores a largo plazo. Alcanzar una separación óptima entre aerogeneradores también es crucial para evitar el efecto estela y optimizar la eficiencia.

La energía eólica offshore ofrece ventajas significativas sobre la eólica onshore en términos de mayor potencial de generación debido a vientos más fuertes y la capacidad de construir parques eólicos más grandes; además, reduce los impactos visuales y minimiza la interacción con las poblaciones y fauna terrestre. Sin embargo, también presenta desafíos mayores, incluyendo costos de instalación y mantenimiento más altos y complejidades técnicas. Por otro lado, dependiendo de la realidad nacional, la eólica onshore puede enfrentar limitaciones de espacio y mayor resistencia por parte de las comunidades locales debido a los impactos visuales y de ruido, no siendo este uno de los factores más relevantes en Uruguay.

Una de las actividades de construcción más intensivas es la construcción de las fundaciones de los aerogeneradores, que pueden ser de monopilotes, estructuras de base gravedad, jackets, o estructuras de tipo flotante (que sirven para mayores profundidades). La elección del tipo de fundación dependerá en gran medida de la profundidad del lecho marino, lo que aumenta la complejidad y los costos de instalación y mantenimiento en comparación con proyectos onshore. A nivel internacional, aún existen desafíos en el diseño y producción de aerogeneradores a gran escala.

En Uruguay, la Zona Económica Exclusiva se delimitó hasta un área de profundidad de 100 metros, recomendando especialmente las zonas entre 20 a 60 metros que son las más viables para la construcción de proyectos de este tipo. A estas profundidades las fundaciones monopilote se convierten en una opción más viable, debido a los altos costos de alcanzar mayores profundidades. Sin embargo, se identifica dentro de la investigación que la fundación de estructuras de base gravedad podría ser la de menor impacto ambiental.

Los proyectos enfrentan desafíos logísticos significativos, como la necesidad de un puerto de preparación y la logística de transporte y manejo de componentes voluminosos y pesados, pudiendo ser este un desafío en el área del Puerto de Montevideo. La selección del sitio del puerto debe tomar en consideración el valor

paisajístico de la zona, las zonas protegidas y áreas sensibles, para evitar conflictos con las comunidades.

La configuración del sistema de electrólisis también es crucial en cuanto a los posibles impactos ambientales, pudiendo ubicarse la planta de producción en el agua (offshore) cerca del parque eólico o en tierra dependiendo de las condiciones específicas del proyecto. La electrólisis offshore se percibe como más recomendada que la onshore, debido principalmente a que el sector marítimo cuenta con una amplia experiencia en plataformas marinas y se podría gestionar desde una plataforma. Además, esta configuración presenta un área de afectación menor, teniendo todo el proceso contenido en un área de influencia de menor alcance, por lo tanto, menores impactos ambientales asociados. Entre estas, la opción más recomendada, desde el punto de vista ambiental, es la electrólisis integrada dentro del aerogenerador, pues no se requieren grandes plataformas de electrólisis adicionales en plataformas offshore, lo que podría reducir el costo total de la infraestructura y los impactos ambientales acumulativos; sin embargo, esta tecnología no está muy estudiada y desarrollada a nivel internacional.

Los electrolizadores PEM, aunque más caros y con menor durabilidad que los AEL, presentan más ventajas operativas para este tipo de proyectos, pues pueden soportar mejor las condiciones de intermitencia del recurso eólico durante la operación. Además, tiende a ser la tecnología de producción de hidrógeno verde que menos agua consume durante el proceso.

La electrólisis del agua requiere agua de alta pureza, y en proyectos offshore, el agua de mar debe ser desalinizada para evitar daños de equipos por corrosión y desgaste de las membranas del electrolizador. La gestión de residuos resultantes y las presiones sobre los consumos de recursos naturales, como el consumo de agua, acero y hormigón son consideraciones importantes en la fase de construcción y operación.

Los medios que podrían resultar más afectados durante todas las fases de estos proyectos (desarrollo, construcción y operación) son el físico y el biótico, siendo uno de los factores ambientales más afectados en general el de la fauna marina.

Durante la fase de desarrollo de proyectos en la ZEE los impactos ambientales más significativos afectan al medio biótico. Las actividades de desarrollo incluyen estudios geofísicos y geotécnicos, los cuales generan ruido y alteraciones del lecho marino, afectando negativamente a diversas especies marinas. Los equipos utilizados en estos estudios pueden ser altamente invasivos, generando niveles de ruido que perturban a los mamíferos marinos, como ballenas y delfines presentes en la ZEE, así como a peces y tortugas marinas. La alteración del lecho marino y la perturbación de los hábitats marinos pueden tener consecuencias a largo plazo para la biodiversidad y los ecosistemas. El tráfico marítimo, necesario para la movilización de equipos y personal durante esta fase, también incrementa los riesgos de colisiones con especies y derrames de combustible, lo que puede deteriorar la calidad del agua y afectar la vida marina. Además, los contaminantes químicos y cambios en la hidroquímica generados por estas actividades impactan negativamente en la vida acuática.

Para mitigar estos impactos, se proponen medidas como el monitoreo visual y acústico de mamíferos marinos, el establecimiento de zonas de exclusión acústica y la implementación de inicios suaves de estudios para reducir el ruido. También es

recomendable planificar los estudios para evitar temporadas de desove y cría (en especial de la merluza), minimizar la superposición de estudios en tiempo y espacio, con el fin de evitar impactos acumulativos, y llevar a cabo estudios de línea de base detallados.

En la fase de construcción, los impactos ambientales más relevantes están relacionados con los medios físico y biótico, específicamente relacionado con el aumento de los niveles de ruido, la afectación de la calidad del agua y del aire. Las actividades como el dragado y la instalación de cables submarinos liberan sedimentos y contaminantes en el agua, alterando la turbidez y afectando la calidad del agua y el lecho marino. El aumento de los niveles de presión sonora, generados por el uso de martillos hidráulicos para el hincado de fundaciones y el tráfico marítimo, pueden causar daños físicos y estrés en la fauna marina, afectando a peces, cefalópodos, plancton, bentos, reptiles y mamíferos marinos presentes en la ZEE.

La construcción de fundaciones para las torres eólicas implica la introducción de estructuras en el lecho marino, lo cual puede causar perturbaciones significativas en el hábitat marino. Estas actividades cambian la turbidez del agua y liberan sedimentos, afectando la calidad del hábitat marino y la biodiversidad asociada. Para mitigar estos impactos, se deben implementar medidas de disuasión de fauna como el uso de pingers, cortinas de burbujas, o sistemas de propulsión a chorro de embarcaciones para evitar posibles colisiones de la fauna con las hélices, además de planificar adecuadamente el tráfico marítimo para reducir las colisiones y el ruido subacuático.

La fase de operación de proyectos presenta impactos ambientales principalmente en el medio físico, pero que se relacionan directamente con los medios biótico y antrópico. La afectación de la calidad del agua y consumo de recursos naturales está fuertemente relacionada con el proceso de desalinización. La desalinización consume una gran cantidad de energía y agua, y genera salmuera concentrada como subproducto, que en forma de efluente puede alterar la salinidad y la oxigenación del agua. La presencia de productos químicos utilizados en el proceso de desalinización puede introducir contaminantes adicionales en el medio marino. Estos impactos pueden ser mitigados mediante tecnologías de desalinización más eficientes y prácticas de gestión de efluentes adecuadas, pero siguen siendo un desafío importante para los proyectos.

La mortalidad y lesiones de aves por colisiones con aerogeneradores puede ser uno de los impactos más significativos durante la fase de operación. Las especies migratorias están especialmente en riesgo, y la alteración de sus patrones de distribución y comportamiento debido al ruido y la infraestructura del proyecto puede tener efectos a largo plazo en sus poblaciones. Los impactos sobre la fauna marina incluyen posibles lesiones o mortalidad por colisiones con estructuras marinas y la perturbación de sus hábitats por vibraciones y ruido submarino. Las operaciones de mantenimiento y el aumento del tráfico marítimo también afectan la calidad del agua y los recursos naturales.

Las medidas de mitigación incluyen el uso de equipos disuasorios de aves, la reducción o apagado selectivo de aerogeneradores durante las migraciones y la implementación de sistemas de dosificación o tratamiento de aguas residuales para gestionar adecuadamente los residuos líquidos generados durante la operación.

La producción y almacenamiento del hidrógeno presentan desafíos ambientales y de seguridad. La compresión y almacenamiento del hidrógeno podrían generar niveles significativos de ruido, afectando tanto a la fauna local como a las comunidades cercanas. Los riesgos de seguridad, fugas e incendios asociados con el manejo del hidrógeno, debido a su alta inflamabilidad y explosividad, requieren la implementación de estrictas medidas preventivas y normativas adecuadas.

La construcción de estos proyectos requiere de grandes cantidades de materiales como acero, hormigón, cobre y metales raros (para la electrólisis PEM), cuya extracción y procesamiento contribuyen a la degradación ambiental, aumento de la minería y generan emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el uso intensivo de agua para la electrólisis puede competir con los recursos hídricos locales; sin embargo, en la opción de la electrólisis offshore (o cuando se utilice agua de mar) este impacto no existiría.

Se recomienda el uso de agua de mar frente al uso de agua dulce ya que ayuda a conservar los recursos hídricos terrestres. Esta práctica es otra de las ventajas de la electrólisis centralizada offshore, donde el agua de mar puede ser desalinizada y utilizada directamente en el proceso. Este enfoque no solo alivia la presión sobre las fuentes de agua dulce del Uruguay, sino que también optimiza la logística y la eficiencia del proceso al situar las plantas de electrólisis cerca de las fuentes de energía eólica y del agua necesaria.

Los impactos acumulativos de los proyectos son una preocupación importante debido a su potencial para causar efectos a largo plazo y a gran escala en el ambiente marino y costero. Los impactos acumulativos se refieren a la suma de efectos que se producen cuando se desarrollan múltiples proyectos en una misma área, o cuando las actividades de un solo proyecto generan efectos que se acumulan a lo largo del tiempo.

Además, el ruido submarino generado por múltiples actividades de construcción y operación puede tener efectos acumulativos significativos en la fauna marina. Los mamíferos marinos, como ballenas y delfines, y otros organismos sensibles al sonido, pueden experimentar niveles de estrés y desplazamiento a largo plazo debido a la exposición continua al ruido. Esto puede alterar sus patrones de comportamiento, reproducción y migración, afectando la salud de sus poblaciones. Por esto se recomienda comenzar con una planificación estratégica que regularice el cronograma y los tiempos de construcción de los proyectos, para evitar que estén todos construyendo al mismo tiempo.

La evaluación de los impactos ambientales de los proyectos debe incluir la cuantificación detallada de la magnitud e intensidad de los impactos en cada fase del proyecto. En esta investigación se identificaron los principales impactos potenciales; sin embargo, es imprescindible realizar una evaluación específica para cada uno de ellos, con el objetivo de determinar su relevancia y establecer las medidas de mitigación correspondientes.

Se destaca que la operación de parques eólicos offshore y plantas de electrólisis genera efectos positivos, como la creación de nuevos ecosistemas artificiales. Los aerogeneradores y la infraestructura del proceso de electrólisis pueden actuar como arrecifes artificiales, fomentando la colonización de diversas especies marinas y contribuyendo a la biodiversidad local. Esta transformación de las comunidades biológicas locales puede generar oportunidades económicas adicionales, como el

ecoturismo y la investigación científica, impulsando el crecimiento económico y el desarrollo sostenible en las regiones costeras.

Otro impacto positivo presente en todas las etapas del proyecto es la generación de empleo. Desde el desarrollo y construcción hasta la operación y mantenimiento se requieren de ingenieros, técnicos, especialistas en logística, y personal de mantenimiento, así como científicos e investigadores para el desarrollo de nuevas tecnologías. Además, fomenta el crecimiento de industrias auxiliares y proveedores locales, creando un efecto multiplicador en la economía.

12. Recomendaciones Generales

12.1. Desarrollo de un Marco Regulatorio Integral

Para iniciar la construcción y operación de proyectos offshore, es necesario obtener una serie de permisos clave, entre los cuales se incluyen, aunque no se limitan a: un permiso o concesión del espacio marítimo, una autorización para explotar la fuente de energía o generar electricidad, un acuerdo de conexión a la red eléctrica, permisos ambientales y permisos para cualquier trabajo en tierra que sea necesario para respaldar las instalaciones en el mar. Además, todos los permisos relacionados con la operación de aerogeneradores y almacenamiento de hidrógeno y subproductos.

La falta de un enfoque simultáneo para gestionar estos permisos puede generar grandes desafíos. Por ejemplo, cuando no hay claridad sobre las funciones y responsabilidades entre departamentos o autoridades, pueden ocurrir retrasos significativos. Procesos de permisos que sean complejos, redundantes o prolongados incrementan el riesgo de los proyectos, lo que dificulta su viabilidad. Por lo tanto, es fundamental contar con un proceso de permisos coherente y eficiente que respalde y acelere el desarrollo de la energía eólica offshore. Esto incluye la coordinación interinstitucional, simplificación de trámites y alineación con los objetivos nacionales para garantizar que los proyectos puedan avanzar de manera ágil y sostenible (GWEC & IRENA, 2023).

Se recomienda que en Uruguay se establezcan, desde la etapa más temprana de planificación, normas y regulaciones claras y específicas para el desarrollo, instalación y operación de parques eólicos offshore y plantas de electrólisis, ya que actualmente no hay regulaciones específicas en el país. Se sugiere evaluar los requisitos de evaluación ambiental basados en normativas internacionales y aprovechar la experiencia y lecciones aprendidas de países con una industria eólica offshore y de producción de hidrógeno verde más desarrollada. Además, se recomienda evaluar los permisos necesarios y realizar evaluaciones ambientales preliminares para los estudios de la fase de desarrollo, ya que estos pueden ocasionar impactos relevantes en el entorno.

Uruguay puede establecer acuerdos de cooperación con otros países y organizaciones internacionales para compartir conocimientos, tecnologías y mejores prácticas en el desarrollo de proyectos eólicos offshore y de hidrógeno verde.

El desarrollo de un marco regulatorio integral en Uruguay puede basarse en la experiencia de países con experiencia en el sector, como Reino Unido y Dinamarca, los cuales son ejemplos destacados de países que han desarrollado marcos regulatorios

avanzados y exitosos para el crecimiento de la energía eólica offshore. Dinamarca, ha establecido un modelo basado en una planificación espacial marina clara, regulaciones ambientales específicas y procesos de licitación competitivos para proyectos offshore. Por su parte, el Reino Unido tiene un enfoque regulatorio integral gestionada por instituciones como el Crown Estate, que facilita el acceso a áreas marinas para proyectos eólicos. Además, el Reino Unido ha implementado políticas como el Offshore Wind Sector Deal que establece objetivos específicos para incrementar la capacidad instalada y reducir costos, al tiempo que fomenta la cooperación entre el gobierno y la industria (UK Government, 2020). Ambos países han demostrado cómo regulaciones claras y coherentes, combinadas con incentivos y colaboración público-privada, pueden impulsar el desarrollo sostenible de la energía eólica offshore, ofreciendo un modelo a seguir para países emergentes en esta tecnología.

También Estados Unidos ha adoptado un enfoque basado en la planificación espacial marina y la subasta de derechos para desarrollar proyectos en áreas designadas, gestionado principalmente por el Bureau of Ocean Energy Management (BOEM 2024). Este enfoque asegura que los proyectos sean compatibles con otras actividades marinas, como la pesca y la navegación, mientras minimizan los impactos ambientales.

Una solución que ha permitido simplificar y agilizar los procesos de permisos en proyectos de energía eólica offshore es la implementación de una Ventanilla Única (OSS, por sus siglas en inglés). Este modelo centraliza la gestión de permisos mediante un único punto de contacto que colabora directamente con los desarrolladores. La OSS facilita la coordinación entre diversas autoridades y permite integrar habilidades regulatorias en una sola entidad, lo que mejora la transparencia y eficiencia del proceso. Países como Dinamarca ya han implementado este modelo a través de la Agencia Danesa de Energía (DEA), que gestiona todas las licencias necesarias para proyectos offshore, desde investigaciones preliminares hasta la explotación de energía. Este enfoque reduce las incertidumbres y acelera el proceso, garantizando que los proyectos cumplan con los requisitos técnicos y ambientales. Costa Rica, por su parte, ha logrado resultados similares utilizando la Ventanilla Única de Inversión, que ha reducido los tiempos de procesamiento de permisos a menos de 45 días y está explorando su uso para proyectos de energía eólica offshore.

GWEC & IRENA destacan que establecer la OSS no implica que todas las aprobaciones sean gestionadas exclusivamente por esta entidad, ni que los mandatos legislativos sean transferidos desde otras autoridades hacia la OSS. La función principal de la OSS es actuar como un punto de contacto centralizado, encargado de guiar y facilitar el proceso de permisos para los proyectos.

12.2. Planificación Espacial Marina (MSP)

Se recomienda que el desarrollo de la industria de proyectos offshore en Uruguay se inicie acompañada de una Planificación Espacial Marina (MSP, por sus siglas en inglés).

La MSP es un enfoque estratégico e integral orientado a regular los entornos marinos mediante la asignación de espacios que consideren los diversos y, en ocasiones, conflictivos usos del mar. Su objetivo principal es facilitar el desarrollo sostenible de actividades marítimas. Según GWEC e IRENA (2023), la MSP debe implementarse al inicio del proceso de permisos como herramienta de zonificación, involucrando a múltiples partes interesadas desde las primeras etapas para mitigar riesgos. Este

enfoque permite acelerar la aprobación de proyectos y minimizar posibles conflictos. Los resultados de experiencias previas en la gestión de espacios marinos evidencian los beneficios de integrar la MSP en los procesos de permisos regulatorios.

La MSP reúne a actores clave como la industria energética, organismos gubernamentales, sectores de conservación, y comunidades recreativas para tomar decisiones coordinadas e informadas que promuevan el uso sostenible de los recursos oceánicos. En 2021, la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (IOC-UNESCO), en colaboración con la Unión Europea, desarrolló la Guía Internacional para la Planificación Espacial Marina/Marítima, que orienta la implementación de prácticas de MSP a nivel mundial. En 2009, la misma entidad ya había publicado el documento Planificación Espacial Marina: Un Enfoque Paso a Paso hacia la Gestión Basada en Ecosistemas, que se convirtió en un estándar de referencia global (GWEC & IRENA, 2023).

Un modelo destacado es la Hoja de Ruta para el Desarrollo de la Energía Eólica Offshore y Energía Marina del gobierno español, presentada en diciembre de 2021. Este documento prioriza el uso de la MSP para agilizar los procesos de permisos y fomentar la coordinación en el acceso a infraestructuras de conexión existentes y futuras. En marzo de 2023, España consolidó este enfoque mediante un decreto que identifica las áreas marinas más adecuadas para parques eólicos offshore, garantizando su compatibilidad con otros usos y actividades actuales y futuras.

Para Uruguay, se recomienda la implementación de consultas públicas desde las etapas iniciales de la planificación marítima, asegurando la participación de sectores relevantes, especialmente el pesquero, con el fin de garantizar transparencia y fomentar el consenso comunitario. Además, se debe incluir el análisis de impactos acumulativos y desarrollar estrategias específicas para las fases de estudio y construcción de los proyectos. Esto permitirá mitigar impactos temporales relacionados con ruido, vibraciones, y cambios en la calidad del agua y el aire, promoviendo un desarrollo sostenible y equilibrado de las actividades marítimas.

12.3. Promoción de Investigaciones y Estudios

Se recomienda promover investigaciones para comprender mejor los impactos ambientales y sociales de los proyectos eólicos offshore e hidrógeno verde en el país. Actualmente el conocimiento es muy escaso, incluso a nivel internacional, por lo que se debe llevar un análisis más profundo de la ZEE y entender las especies que habitan y como interactúan con el entorno.

Se puede solicitar a los desarrolladores la entrega de resultados de estudios de línea de base hechos en las áreas de la ZEE con el fin de enriquecer la información pública de la zona y comenzar a generar líneas de base ambientales públicas para promover la investigación, desarrollo y participación ciudadana.

De acuerdo con Tamara Al-Hashimi (2022) las lecciones clave aprendidas del desarrollo de la industria offshore de Europa y el Reino Unido se pueden resumir en:

- **Selección de sitios:** Identificar ubicaciones apropiadas es crucial para descartar áreas que no cumplan con los requisitos necesarios y prevenir inversiones en lugares que no obtendrán aprobación. Este proceso debe considerar limitaciones espaciales, rutas de navegación y zonas protegidas, como reservas marinas.

- **Flexibilidad en el diseño:** Los proyectos offshore deben incorporar flexibilidad en sus diseños debido al avance constante de las tecnologías y los extensos plazos de aprobación. Un enfoque como el "diseño en sobre", empleado en el Reino Unido, permite realizar modificaciones en aspectos clave como la cantidad de turbinas y los tipos de cimientos durante el proceso de desarrollo.
- **Levantamiento de información de líneas de base:** Es imprescindible establecer líneas de base robustas para recopilar información ambiental que sirva como base para las evaluaciones de impacto. En el caso de Uruguay, donde los datos existentes son limitados, los desarrolladores deberán llevar a cabo estudios detallados que faciliten a las autoridades ambientales evaluar las condiciones locales y los posibles efectos de los proyectos.
- **Bases de datos digitales:** Es fundamental construir bases de datos digitales y consultables que incluyan registros de concesiones y ubicaciones de proyectos. Las bases de datos digitales son herramientas clave para mantener a los desarrolladores bien informados sobre los sitios adecuados para proyectos offshore y para facilitar la realización de Evaluaciones de Impacto Ambiental, pasos críticos en el proceso de permisos. En áreas donde se enfrenta resistencia comunitaria, datos bien recolectados pueden ser utilizados para desarrollar medidas de mitigación.

12.4. Estudio de Impacto Ambiental

Antes de la instalación de todo proyecto se debe realizar un Estudios de Impacto Ambiental (EIA), que es un análisis detallado de las posibles repercusiones ambientales y sociales asociadas a un nuevo proyecto de infraestructura. Generalmente, los EIAs se realizan de forma individualizada, abordando aspectos como soluciones técnicas, medidas de seguridad ambiental y marítima, procesos de planificación de las organizaciones, y la participación y aprobación de las partes interesadas tanto en tierra como en el mar.

Los proyectos de energía eólica offshore requieren una evaluación integral de su impacto, que abarque aspectos ambientales, socioeconómicos y otros factores relevantes. Un proceso de EIA bien diseñado debe identificar estrategias para prevenir, reducir o mitigar los impactos potenciales sobre los recursos naturales y otros usuarios del entorno marítimo. Deben cumplir con los estándares internacionales y las buenas prácticas internacionales de la industria, lo que implica el uso de habilidades profesionales, diligencia, prudencia y una visión anticipada, características esperadas de profesionales con experiencia en proyectos similares a nivel global o regional.

Asimismo, una evaluación de línea de base sólida es esencial para un EIA efectivo, ya que brinda información clave para comprender las condiciones sociales y ambientales del área del proyecto antes de su desarrollo. Esto incluye la identificación de zonas sensibles o protegidas, la evaluación de las condiciones preexistentes y la garantía de cumplimiento con la normativa aplicable.

La participación de las partes interesadas es una etapa clave en el proceso de permisos para proyectos de energía eólica offshore y en el desarrollo general del proyecto, ya que permite identificar y abordar inquietudes. Este proceso debe integrarse con la

Evaluación de Impacto Ambiental. Grupos locales, como pescadores y comunidades locales, pueden aportar retroalimentación valiosa y expresar sus preocupaciones. Un EIA bien estructurada, combinada con una participación efectiva de las partes interesadas, puede facilitar la obtención de los permisos necesarios de manera más eficiente.

La experiencia europea demuestra que es beneficioso aclarar desde el principio si existen posibles conflictos de uso en el espacio marítimo destinado a proyectos de energía eólica. El diálogo temprano entre las autoridades pertinentes puede ayudar a identificar problemas de coexistencia y diseñar medidas de mitigación, cuando sea posible (GWEC & IRENA, 2023).

En la mayoría de los países europeos, la participación de las partes interesadas se exige durante las etapas iniciales de investigación preliminar. En contraste, en países como Estados Unidos y Canadá, este proceso se lleva a cabo en múltiples etapas o incluso a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto. En Estados Unidos, las consultas con las partes interesadas comienzan al inicio del desarrollo del proyecto, incorporando períodos de comentarios públicos en cada una de las etapas regulatorias. Entre las partes que deben ser consultadas se incluyen comunidades indígenas, residentes cercanos al proyecto, entidades públicas y privadas, pescadores, navegantes y asesores legales (GWEC & IRENA, 2023).

Se recomienda incentivar el uso de tecnologías eficientes y sostenibles para minimizar el impacto general de los procesos. El uso de embarcaciones y maquinaria eficientes puede disminuir los impactos relacionados con la afectación de la calidad del aire.

Por último, Uruguay debería priorizar tecnologías sostenibles que minimicen los impactos ambientales. Esto incluye fomentar el uso de agua de mar para la producción de hidrógeno renovable, promoviendo tecnologías de electrólisis más eficientes y con menor dependencia de metales nobles. También se deben establecer sistemas de gestión ambiental que evalúen y mitiguen impactos acumulativos, asegurando la sostenibilidad a largo plazo de los proyectos de energía eólica offshore.

12.5. Desarrollo de Infraestructura y Logística

Es necesario identificar e invertir en la mejora y ampliación de la infraestructura portuaria y logística para solucionar los desafíos que enfrentarán los proyectos y evitar el congestionamiento de los servicios y el colapso del sector en Uruguay.

Países como el Reino Unido, Dinamarca y los Países Bajos han demostrado que la modernización y adaptación de puertos especializados son clave para el manejo eficiente de turbinas, torres y cimientos de gran tamaño. Por ejemplo, el puerto de Esbjerg, en Dinamarca, ha sido transformado en un centro logístico estratégico que ha reducido significativamente los tiempos de instalación y los costos operativos de los proyectos offshore (WindEurope, 2021). Según WindEurope, esta optimización puede representar hasta un 15% de ahorro en los costos totales de un proyecto. Además, estas iniciativas generan beneficios económicos al crear empleos directos e indirectos tanto en la construcción como en la operación de estas instalaciones (GWEC, 2022).

En el contexto uruguayo, es fundamental realizar un análisis de los puertos existentes, para identificar su potencial de adaptación como centros logísticos para proyectos offshore. Esta evaluación debe considerar criterios como la accesibilidad, la capacidad

de expansión y su proximidad a los sitios seleccionados para las instalaciones de los proyectos. Al mismo tiempo, es importante evitar que estos puertos se ubiquen en zonas costeras sensibles o protegidas, como áreas de alto valor ambiental o turístico, para minimizar los impactos en las comunidades locales.

La planificación estratégica debe incluir la creación de mapas de la costa uruguaya para identificar ubicaciones de puertos óptimas basadas en factores logísticos, ambientales y sociales. Este enfoque puede inspirarse en la Hoja de Ruta de Energías Marinas de España, que incluye una planificación detallada para garantizar una integración sostenible de la infraestructura portuaria en proyectos de energía renovable (MITECO, 2021). Asimismo, es crucial fomentar acuerdos público-privados que permitan financiar las mejoras necesarias en los puertos, involucrando posiblemente a los desarrolladores de proyectos offshore en los costos de esta infraestructura. Como por ejemplo los casos destacados de Estados Unidos incluyen la renovación del Puerto de Humboldt Bay con 10,5 millones de dólares para apoyar el desarrollo de 1,6 GW de energía eólica en el área de Humboldt, y la inversión de 100 millones de dólares anunciada por la administración Baker-Polito en Massachusetts para fortalecer los puertos dedicados a la energía eólica offshore. Como también la Terminal Marina de South Quay en Rhode Island han recibido 95 millones de dólares en apoyo estatal para actualizar su infraestructura y facilitar futuras actividades comerciales relacionadas con la energía

Tomando como referencia los avances de Europa, especialmente en el Mar del Norte, Uruguay podría identificar puertos adecuados, para desarrollar proyectos piloto que integren la energía eólica offshore con la producción de hidrógeno. Además, sería crucial establecer un marco regulatorio favorable y fomentar la colaboración público-privada para financiar la infraestructura necesaria (Wind Europe, 2021).

12.6. Formación y Capacitación

Se recomienda implementar programas de capacitación y desarrollo de habilidades para la fuerza laboral local en tecnologías de energía eólica y producción de hidrógeno verde.

Uruguay cuenta con amplia experiencia en el sector de energía eólica onshore, pero no en energía eólica offshore y producción de hidrógeno verde. Por lo tanto, se debe fomentar la colaboración entre instituciones académicas, centros de investigación, entes regulatorios, entes gubernamentales y la industria para asegurar una base de conocimientos sólida y actualizada en la fuerza laboral local.

Se debe priorizar la inversión en la formación y capacitación de personal que actuará como evaluador de los procesos de permisos, con enfoque en competencias digitales y técnicas necesarias para gestionar el creciente número de proyectos en el sector eólico offshore e hidrógeno verde. La falta de personal capacitado en las instituciones de evaluación puede generar retrasos en los procesos de permisos y limitar la capacidad de las autoridades para evaluar proyectos de manera eficiente y transparente.

Una estrategia clave sería fomentar programas de formación en habilidades digitales, en colaboración con universidades, asociaciones de la industria eólica y empresas del sector. Esto puede incluir cursos específicos sobre gestión de datos, uso de herramientas digitales avanzadas y análisis de impacto ambiental. Además, será necesario que se asignen fondos para contratar más personal especializado y adquirir herramientas tecnológicas que optimicen los procesos administrativos relacionados con la concesión de permisos.

Por ejemplo, Uruguay podría adoptar una solución similar a la desarrollada por WindEurope, Amazon Web Services (AWS) y el Foro Económico Mundial, que permite la automatización de flujos de trabajo y la gestión centralizada de documentos (GWEC & IRENA, 2023). Esta herramienta, utilizada en la Unión Europea, ha demostrado mejorar la precisión y la transparencia en la tramitación de permisos, al tiempo que reduce significativamente los tiempos de procesamiento. La implementación de una solución digital de este tipo permitiría a Uruguay no solo gestionar de manera más eficiente los permisos de proyectos offshore, sino también establecer estándares de transparencia que fortalezcan la confianza entre desarrolladores, comunidades locales y el gobierno.

Además, el desarrollo de habilidades digitales y técnicas contribuiría al fortalecimiento del mercado laboral en el país, generando oportunidades de empleo tanto directas como indirectas en el sector de la energía renovable.

Bibliografía

- ABB S.A. (2023). [www.abb.es](https://library.e.abb.com/public/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/Cuaderno%20Tecnico_num%2012_Plan-tas%20eolicas.pdf). Obtenido de https://library.e.abb.com/public/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/Cuaderno%20Tecnico_num%2012_Plan-tas%20eolicas.pdf
- Acciona. (2019). ¿Qué es la ósmosis inversa? Obtenido de <https://www.acciona.com/es/tratamiento-de-agua/desalacion/#:~:text=Este%20proceso%20de%20desalaci%C3%B3n%20consiste,para%20obtener%20el%20agua%20dulce>
- Al-Hashimi, T. (2022). Key lessons from the UK offshore wind experience for Australia and New Zealand. RPS Group. Obtenido de: <https://rpsgroup.com/insights/aap/key-lessons-australia-can-take-from-the-uk-offshore-wind-experience/>
- Anaya-Lara, O., Tande, J., Uhlen, K., & Merz, K. (2018). Offshore Wind Energy Technology. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd.
- 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.
- Asociación Empresarial Eólica de España (AEE). (2021). FAQs EÓLICA MARINA. Obtenido de <https://www.aeeolica.org/images/Posicionamientos/20210708-FAQs-de-Elica-marina.pdf>
- Asociación Nacional de Puertos. (2023, septiembre 01). Puerto de Montevideo: Infraestructura Física. Obtenido de http://aplicaciones.anp.com.uy/montevideo/infraestructura/mvd_infraestructura.asp#:~:text=La%20superficie%20acu%C3%A1tica%20del%20puerto,militad%20est%C3%A1%20dedicada%20a%20operaciones
- Armstrong, I. (2018). Criterios de Instalación de un Parque Eólico Marino. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Ayşenur Öztürk Aydın, A. B. (2023). Hydrogen Safety Issues: The Inherent Challenges of Hydrogen and Possible Precautions. En Hydrogen Fuel Cell Technology for Mobile Applications. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-6721-3.ch009>
- Barreiro, M. (2023, diciembre 29). Física del Sistema Climático. Obtenido de http://www.meteorologia.edu.uy/wp-content/uploads/2019/Fisica_del_sistema_climatico/Clase4.pdf
- 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.
- Bureau of Ocean Energy Management (BOEM). (2024). Regulatory framework and guidelines. Obtenido de: <https://www.boem.gov/renewable-energy/regulatory-framework-and-guidelines>

- Bošnjaković, M., Katinić, M., Santa, R., & Marić, D. (2022). Wind Turbine Technology Trends. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app12178653>
- BVG Associates. (2019). Guide to an offshore wind farm. BVG Associates Limited.
- Byrnes, T., & Dunn, R. (2020). Boating- and Shipping-Related Environmental Impacts and Example Management Measures: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse8110908>
- Calado, G., & Castro, R. (2023, septiembre 07). Hydrogen Production from Offshore Wind Parks: Current Situation and Future Perspectives. *Appl. Sci.* <https://doi.org/10.3390/>
- Canga-Argüelles, A. A. (2021). Análisis del Estado del Arte de aerogeneradores offshore. Estado de la tecnología, ventajas competitivas, limitaciones y principales fabricantes. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Dpto. Ingeniería Energética.
- Casanova, M. I. (2022). Propiedades del Hidrógeno como Vector Energético y una Oportunidad para Chile. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- 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.
- 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>
- Cummins. (2024, junio 07). [www.cummins.com](https://www.cummins.com/sites/default/files/2021-08/cummins-hylyzer-1000-specsheet.pdf). Obtenido de <https://www.cummins.com/sites/default/files/2021-08/cummins-hylyzer-1000-specsheet.pdf>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) y Ministerio de Energía de Chile. (2020). Summary of environmental impacts from green hydrogen projects. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- Díaz, H., & Soares, C. G. (2020). Review of the current status, technology and future trends of offshore. Lisboa: Centre for Marine Technology and Ocean Engineering (CENTEC).
- 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.
- Fan, Q., Wang, X., Yuan, J., & Liu, X. (2022). A review of the development of key technologies for offshore wind power in China. *Journal of Marine Science and Engineering*.
- Fatemeh Rezaei, P. C. (2023). Towards understanding environmental and cumulative impacts of floating wind farms: Lessons learned from the fixed-bottom offshore wind farms. Milan: Elsevier Ltd.

- Fatemeh Rezaei, P. C. (2023). Towards understanding environmental and cumulative impacts of floating wind farms: Lessons learned from the fixed-bottom offshore wind farms. Ocean and Coastal Management, Milan.
- Global Wind Atlas. (2023, mayo 15). www.globalwindatlas.info. Obtenido de <https://globalwindatlas.info/es/>
- 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.
- Gutiérrez, A. (2011). Herramientas de Predicción de muy corta y corta duración de la energía eólica. Montevideo: Facultad de Ingeniería UDELAR.
- Heymo Ingeniería y Ariema. (2020). Informe Final de Asesoría “Análisis de aspectos técnicos y económicos para el desarrollo de una economía de hidrógeno en Uruguay y Paraguay”. POLÍTICA ENERGÉTICA NACIONAL, Paraguay-Uruguay-Alemania.
- Hydrogen Newsletter. (2024, junio 05). www.hydrogennewsletter.com. Obtenido de Top list of Commercial Electrolyzers for Green Hydrogen Production: <https://www.hydrogennewsletter.com/top-commercial-electrolyser-for/>
- Ibon, G., Iratxe, M., Joxe Mikel, G., & al. (2022). Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms. npj: Ocean Sustainability.
- Ibrahim, O. S., Singlitico, A., Proskovics, R., McDonagh, S., Desmond, C., & Murphy, J. D. (2022, febrero 21). Dedicated large-scale floating offshore wind to hydrogen: Assessing design variables in proposed typologies. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112310>
- International Electrotechnical Commission. (2022). IEC 61400-12-1:2022 - Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines. International Electrotechnical Commission.
- International Energy Agency (IEA). (2023). Global Hydrogen Review 2023. Obtenido de www.iea.org
- International Energy Agency (IEA). (2021). Hydrogen in Latin America from near-term opportunities to large-scale deployment. Obtenido de https://iea.blob.core.windows.net/assets/65d4d887-c04d-4a1b-8d4c-2bec908a1737/IEA_HydrogeninLatinAmerica_Fullreport.pdf
- Insight, H. (2022, noviembre 17). Chinese companies take top three slots in BNEF's list of world's 20 largest hydrogen electrolyser makers. Hydrogen Insight. Obtenido de

<https://www.hydrogeninsight.com/electrolysers/chinese-companies-take-top-three-slots-in-bneps-list-of-worlds-20-largest-hydrogen-electrolyser-makers/2-1-1355610>

IRENA & BlueRisk. (2023). Water for hydrogen production. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, BlueRisk.

ITM Power. (2024). ITM Products. Obtenido de <https://itm-power.com/products/poseidon>

Jakob, T. L. (2022). How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines. Journal of the Acoustical Society of America. <https://doi.org/10.1121/10.0002453>

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.

Kumar, S. S., & Himabindu, V. (2019, marzo 29). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. Centre for Alternative Energy Options, Institute of Science and Technology, Jawaharlal Nehru Technological University Hyderabad. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>

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

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.

McPhy. (2024, junio 7). Equipment and Services: Electrolyzers. Obtenido de <https://mcphy.com/en/equipment-services/electrolyzers/large/>

Meier, K. (2014). Hydrogen production with sea water electrolysis using Norwegian offshore wind energy potentials. Bergen: Stuttgart University of Applied Sciences.

Milesi, S. S. (2023, octubre). Revista Marina de Chile. Obtenido de <https://revistamarina.cl/revistas/2014/3/milesi.pdf>

Ministerio de Ambiente. (2021, julio 17). El talud continental es la pendiente pronunciada que se extiende desde el borde exterior de la plataforma continental hasta los 3000 y 4000 m de profundidad. Obtenido de <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/talud-continental#:~:text=El%20talud%20continental%20es%20la,y%204000%20m%20de%20profundidad>

Ministerio de Ambiente. (2022, diciembre 8). Unidad de emisión: Dpto. Gestión Costera y Marina. Obtenido de https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/Informes_sitios_destacados AMP.pdf

MITECO. (2021). Hoja de ruta para el desarrollo de la eólica marina y las energías del mar en España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado de <https://miteco.gob.es>

Nel hydrogen. (2024, junio 07). Water electrolyzers / hydrogen generators. Obtenido de <https://nelhydrogen.com/water-electrolysers-hydrogen-generators/>

Noordende, H. v., & Bollen, R. (2023). Safety aspects of green hydrogen production on industrial scale. Amersfoort: Institute for Sustainable Process Technology (ISPT).

- Nuevo, D. (2020, noviembre 23). La salmuera en el vertido de desaladoras. TECPA. Obtenido de <https://www.tecpa.es/salmuera-desaladora/>
- Ohmium. (2024, junio 9). Our products. Obtenido de <https://www.ohmium.com/our-product>
- 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.
- Plug Power. (2024, junio 07). Best-in-class electrolyzer products. Obtenido de <https://www.plug-power.com/hydrogen/electrolyzer-hydrogen/electrolyzer-products/>
- Qian, C., & Zhi, R. (2023). Review of common hydrogen storage tanks and current manufacturing methods for aluminium alloy tank liners. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.08.002>
- Renée Ferraro, G. G. (2014). Programa oceanográfico de caracterización del margen continental uruguayo. Zona Económica Exclusiva. Montevideo: Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland Facultad de Ciencias, Universidad de la República.
- Renewable Energy Wildlife Institute. (2024, junio 10). 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/>
- República Oriental del Uruguay. (1967). Constitución de la República. Montevideo: ROU.
- República Oriental del Uruguay. (1994). Ley Nro 16466. Ley de Evaluación de Impacto Ambiental. Montevideo: ROU.
- República Oriental del Uruguay. (2005). Decreto N° 349/005. Reglamento de evaluación de impacto ambiental y autorizaciones ambientales. Montevideo: ROU.
- República Oriental del Uruguay. (1998). Ley N° 17033. Bienes del Estado - recursos naturales. Normas referentes a mar territorial, zona económica exclusiva y plataforma continental de la República. Montevideo: ROU.
- Rincón, J. F. (2020). Estudio de implantación de un parque eólico offshore en la costa de Cádiz. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- Rodríguez, O. (2020). Caracterización y estudio de parques eólicos offshore. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Shaddix, C. R. (2022). An assessment of current understanding of the greenhouse gas impacts from H2 emissions. Albuquerque: Sandia National Laboratories.
- Siachos, K. (2022). Offshore green hydrogen production and transportation to shore via pipelines in the North Sea with parallel natural gas transportation. Delft: Delft University of Technology.
- Siemens Energy. (2024, junio 07). Silyzer 300 – Technical Data. Obtenido de https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/03b60af1-899b-4c1d-ab9c-b0f100bcc9d/Brochure-Electrolyzer_Hydrogen-and-Power-to-X-solutions_16_9-pdf_Original%20file.pdf
- Signoria, C., & Barlettani, M. (2023, abril 01). Environmental, health, safety, and social management of green hydrogen in Latin America and the Caribbean: A scoping study. Obtenido de

<https://publications.iadb.org/publications/english/viewer/Environmental-Health-Safety-and-Social-Management-of-Green-Hydrogen-in-Latin-America-and-the-Caribbean.pdf>

- Singlitico, A., Østergaard, J., & Chatzivasileiadis, S. (2021, septiembre 08). Onshore, offshore or in-turbine electrolysis? Techno-economic overview of alternative integration designs for green hydrogen production into offshore wind power hubs. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rset.2021.100005>
- 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>
- Subsea Working Group. (2000). Guidance notes on geotechnical investigations for subsea structures. Offshore Soil Investigation Forum.
- Sundin, C. (2019). Environmental assessment of electrolyzers for hydrogen gas production. Estocolmo: KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences in Chemistry, Biotechnology and Health.
- Sustainable Energy Fuels. (2023). Impact of impurities on water electrolysis: a review. The Royal Society of Chemistry.
- Surface Water Ambient Monitoring Program (SWAMP). (2024). California Water Boards. Obtenido de https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf
- 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/>
- 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>
- 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.
- Vester, N. (2024, junio 24). Kattegat West Baltic Bats Project. Obtenido de <https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2024/are-bats-and-wind-turbines-a-viable-cocktail-at-sea>
- WindEurope. (2021). A 2030 Vision for European Offshore Wind Ports: Trends and Opportunities. Obtenido de: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/a-2030-vision-for-european-offshore-wind-ports-trends-and-opportunities/>
- 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>