

(05-001) - Sustainable Development at Sea: Offshore Wind Energy as an Engine of Industrial Decarbonization, optimized method of Emissions Reduction

Gil García, Isabel Cristina ¹; Fernández Guillamón, Ana ²; Ramos Escudero, Adela ³;
García Cascales, María S. ⁴; Molina García, Ángel ⁴

¹ Universidad UDIMA, ² Universidad de Castilla–La Mancha, ³ Universidad Politécnica de Cartagena, ⁴ Universidad Politécnica de Cartagena,

The transition of the energy system towards a fossil fuel-free mode is aligned with the imperative of limiting the increase in global temperature to 1.5°C. We have the necessary tools, being essential the promotion of renewable energies and the acceleration of clean electrification in the energy sector to mitigate emissions. Achieving this requires an unprecedented collaborative effort between industrial sectors and governments. The maritime environment is home to various economic activities, such as offshore wind energy, aquaculture, salt extraction, oil and gas platforms, some with an enduring presence and others requiring decarbonization as they gradually disappear. In this context, the purpose of this study is to develop a methodology that replaces electrical energy from high-emission offshore industrial processes with clean electricity from offshore wind energy. The proposal integrates an optimized geospatial analysis, considering the protected areas of the maritime space and other activities such as fishing, maritime traffic, national defense, etc. The objective function focuses on the reduction of emissions, the proposal is evaluated in the maritime territorial framework of Spain.

Keywords: Energy transition; offshore wind; emissions reduction

Desarrollo Sostenible en el Mar: La Energía Eólica Marina como Motor de Descarbonización Industrial, método optimizado de Reducción de Emisiones

La transición del sistema energético hacia una modalidad libre de combustibles fósiles se alinea con el imperativo de limitar el aumento de la temperatura global a 1,5°C. Contamos con las herramientas necesarias, siendo fundamental el impulso de las energías renovables y la aceleración de la electrificación limpia en el sector energético para mitigar las emisiones. Lograrlo demanda un esfuerzo colaborativo sin precedentes entre los sectores industriales y los gobiernos. El entorno marítimo alberga diversas actividades económicas, como la energía eólica marina, acuicultura, extracción de sal, plataformas de petróleo y gas, algunas con presencia perdurable y otras requiriendo una descarbonización por lo que gradualmente desaparecerán. En este contexto, el propósito de este estudio es desarrollar una metodología que reemplace la energía eléctrica de procesos industriales de altas emisiones en alta mar por electricidad limpia proveniente de la energía eólica marina. La propuesta integra un análisis geoespacial optimizado, considerando las zonas protegidas del espacio marítimo y otras actividades como la pesca, el tráfico marítimo, la defensa nacional, etc. La función objetivo se centra en la reducción de emisiones, centrando la propuesta en el marco territorial marítimo de España.

Palabras clave: Transición energética; eólica marina; reducción de emisiones

Correspondencia: Isabel C. Gil García. isabelcristina.gil@udima.es

Agradecimientos: Proyecto PID2021-126082OB-C22 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

En el actual panorama de emergencia climática, la transición del sistema energético hacia una modalidad exenta de combustibles fósiles emerge como una respuesta vital al desafío global del cambio climático (Arent et al., 2022). Este cambio se alinea de manera crítica con el imperativo de limitar el aumento de la temperatura global a 1,5°C, un objetivo fundamental establecido por la comunidad científica para evitar impactos catastróficos en el clima y los ecosistemas del planeta (McKay et al., 2022).

En este contexto, se destaca la importancia de contar con las herramientas necesarias para llevar a cabo esta transición de manera efectiva y oportuna. Entre estas herramientas, las energías renovables ocupan un papel central, ofreciendo fuentes de energía limpias y sostenibles que pueden sustituir progresivamente a los combustibles fósiles (Chien et al., 2022). La aceleración de la electrificación limpia en el sector energético también se revela como un componente esencial, permitiendo la integración de energías renovables en redes eléctricas más eficientes y resilientes (Salkuti, 2022).

No obstante, el logro de esta transformación trascendental demanda un esfuerzo colaborativo sin precedentes. Es necesario un compromiso firme y coordinado entre los sectores industriales y los gobiernos a nivel global (Xie et al., 2020). La colaboración entre estos actores es fundamental para impulsar políticas públicas ambiciosas que fomenten la inversión en energías renovables, promuevan la innovación tecnológica y faciliten la transición hacia una economía baja en carbono (*The Evolution of Energy Efficiency Policy to Support Clean Energy Transitions – Analysis - IEA*, n.d.).

El entorno marítimo es un escenario que sustenta una amplia gama de actividades económicas, cada una con su propio impacto y relevancia en el desarrollo regional y global (Kronfeld-Goharani, 2018). Destacan actividades como la energía eólica marina, la acuicultura, la extracción de sal y las plataformas de petróleo y gas, que coexisten en un equilibrio delicado entre la sostenibilidad y la necesidad de adaptarse a los desafíos emergentes.

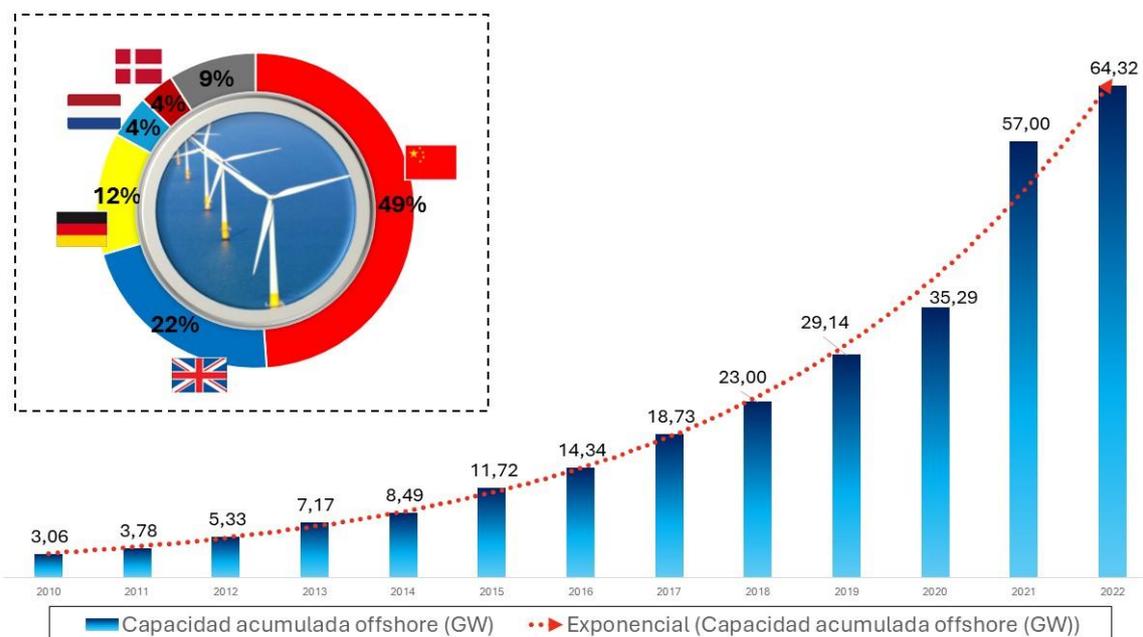
La energía eólica marina ha surgido como una fuerza transformadora en los últimos años, representando un cambio significativo en la matriz energética mundial (Weiss et al., 2018). Con avances tecnológicos continuos y una mayor conciencia sobre la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Esteban et al., 2011). Su potencial para generar electricidad limpia y renovable a partir del poder del viento en alta mar ha capturado la atención de gobiernos, inversores y comunidades por igual.

Durante el período comprendido entre 2010 y 2022, la industria experimentó un asombroso crecimiento exponencial que superó el 2000 % en términos de capacidad total instalada a nivel mundial. China sobresale como líder indiscutible en esta clasificación, con una capacidad instalada de 31,4 GW, lo que representa casi la mitad del total global, con un impresionante 50%. Siguiendo de cerca a China, se encuentran otras potencias en energía eólica, encabezadas por el Reino Unido, que cuenta con 14 GW (22%), seguido por Alemania con 8,1 GW (12%), Países Bajos con 2,9 GW (4%), y Dinamarca con 2,3 GW (3,8%). El resto del mundo también ha contribuido notablemente a este crecimiento, sumando 5,8 GW a la capacidad total instalada, ver Figura 1. Este fenomenal aumento en la infraestructura eólica refleja un crecimiento sin precedentes en el sector, marcando un hito significativo en la transición hacia fuentes de energía renovable a nivel mundial (*Global Wind Report 2023 - Global Wind Energy Council*, n.d.).

Sin embargo, dentro de este panorama diverso, también se observa una variedad de actividades que enfrentan desafíos distintos. Por ejemplo, la acuicultura, que abarca la cría de peces, moluscos y algas, enfrenta desafíos relacionados con la gestión sostenible de los

recursos marinos, la calidad del agua y los riesgos ambientales (Boyd et al., 2020). Por otro lado, la extracción de sal, aunque es una actividad tradicional con una larga historia, debe adaptarse a las demandas cambiantes del mercado y a las preocupaciones ambientales (Boyd et al., 2020).

Figura 1. Evolución de la energía eólica marina. Elaboración propia basada en: (Global Wind Report 2023 - Global Wind Energy Council, n.d.)



Por su parte, las plataformas de petróleo y gas, aunque han desempeñado un papel crucial en la economía mundial durante décadas, enfrentan una presión cada vez mayor para reducir su huella de carbono y adoptar prácticas más sostenibles (Okeke, 2021). Esto se debe en parte a la creciente conciencia pública sobre los impactos negativos del uso prolongado de combustibles fósiles en el medio ambiente y el clima (Megura & Gunderson, 2022).

El desafío para las actividades marítimas es encontrar un equilibrio entre la explotación económica de los recursos marinos y la preservación del ecosistema marino. La transición hacia una economía más verde y sostenible es inevitable, y muchas de estas actividades económicas, especialmente aquellas más intensivas en carbono, enfrentan la necesidad de adaptarse o incluso transformarse por completo. En este ámbito, el objetivo de la presente investigación es proponer una metodología que sustituya la energía eléctrica proveniente de procesos industriales altamente contaminantes en alta mar, por electricidad limpia generada a partir de la energía eólica marina. La propuesta implica la implementación de un análisis geoespacial optimizado que tenga en cuenta diversos factores, como las áreas protegidas en el espacio marítimo, así como otras actividades concurrentes como la pesca, el tráfico marítimo y las operaciones de defensa nacional, entre otras. La función objetivo de este enfoque es la reducción de emisiones, priorizando la sostenibilidad ambiental y la eficiencia energética en el ámbito marino-industrial. Esto, a su vez, contribuiría a alcanzar los objetivos delineados en el desarrollo sostenible, particularmente los objetivos 7, 9 y 13.

La estructura del trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se desarrolla la metodología propuesta, posteriormente, la sección 3 evalúa dicha propuesta a través de un caso de estudio y, finalmente, la última sección 4 presenta las principales conclusiones obtenidas.

2. Metodología

La metodología propuesta consta de tres fases: “Entrada”, “Indicadores” y “Resultados”. Se ofrece una visión general en la Figura 2.

2.1 Etapa: “Entrada”

Esta fase implica la revisión exhaustiva de los datos requeridos para calcular los indicadores correspondientes a la fase 2, ya sean de índole espacial, cualitativa o cuantitativa. Se divide en tres etapas fundamentales:

1. Identificar áreas con potencial para la generación de energía eólica marina.
2. Evaluar qué actividades marinas podrían ser descarbonizadas parcial o totalmente mediante el uso de la energía eléctrica proveniente de los vientos marinos.
3. Seleccionar la tecnología más adecuada de aerogeneradores para la implementación del proyecto.

La tarea de identificar áreas con potencial para la energía eólica marina implica un proceso espacial altamente complejo que abarca una variedad de factores de diversa naturaleza. Entre estos factores se incluyen aspectos climáticos como la velocidad del viento, la batimetría, la altura de las olas y las turbulencias, así como consideraciones ambientales como las áreas protegidas y aspectos sociales como el impacto visual, el nivel de ruido, las rutas marítimas y las zonas de pesca, entre otros (Gil-García et al., 2019). Estos elementos se categorizan en criterios restrictivos y criterios de selección. Esto permite eliminar las capas espaciales que están sujetas a restricciones, dejando así identificadas las zonas con potencial para la energía eólica marina dentro del área de estudio únicamente dependientes de los criterios de selección (Gil-García et al., 2022; Xu et al., 2020).

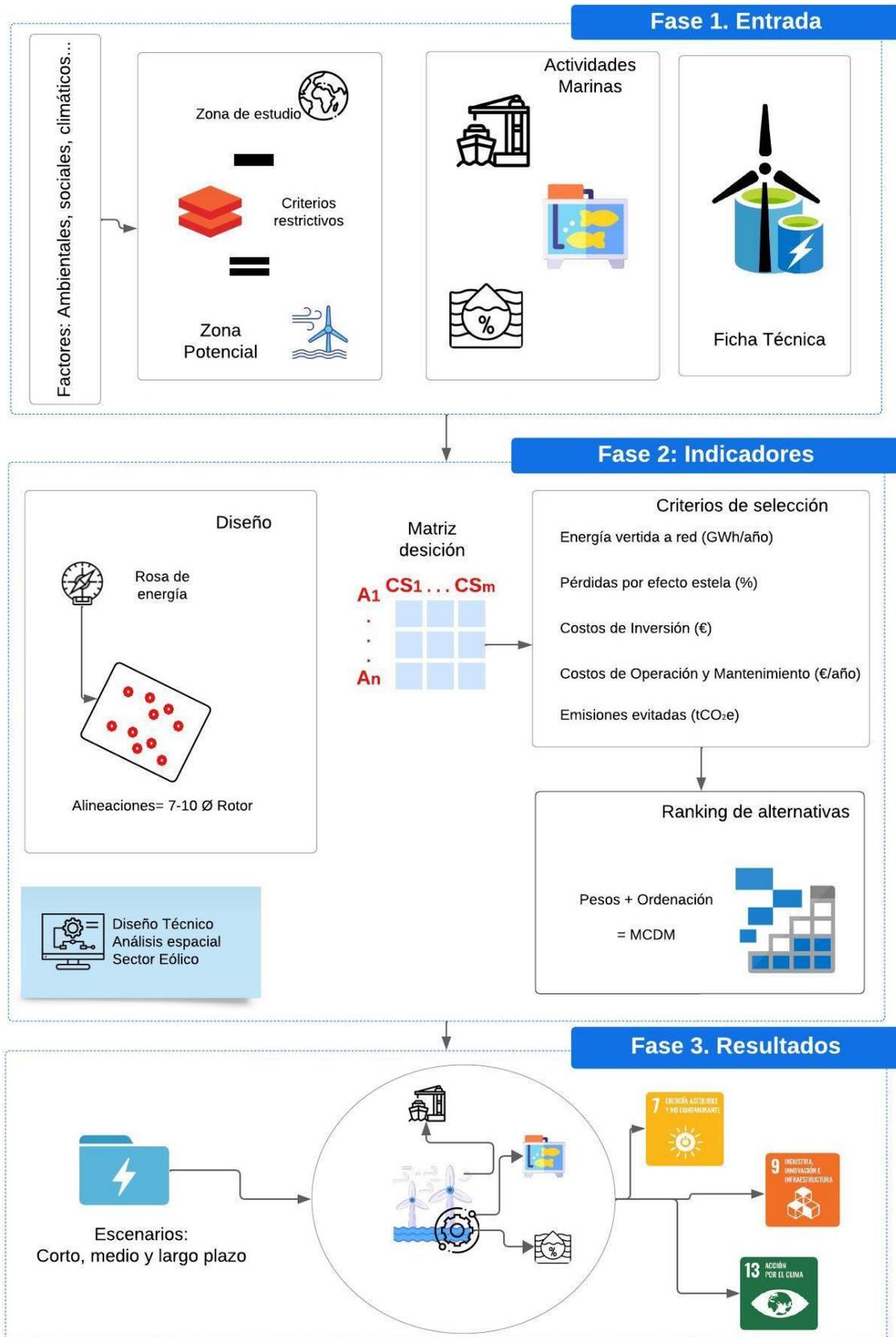
En función del área de estudio, es posible que estas regiones ya estén reguladas, como ocurre en el caso de España. Los Planes de Ordenación del Espacio Marítimo (POEM) son una de las áreas clave dentro de la Política Marítima Integrada de la Unión Europea. Estos planes se implementan para cumplir con las obligaciones establecidas por la Directiva 2014/89/UE del Parlamento Europeo y del Consejo (*BOE.Es - DOUE-L-2014-81825 Directiva 2014/89/UE Del Parlamento Europeo y Del Consejo, de 23 de Julio de 2014, Por La Que Se Establece Un Marco Para La Ordenación Del Espacio Marítimo.*, n.d.), la cual proporciona un marco para la gestión del espacio marítimo.

En el caso de España, esta Directiva se ha incorporado a través de una legislación reglamentaria basada en la Ley 41/2010 (*BOE-A-2010-20050 Ley 41/2010, de 29 de Diciembre, de Protección Del Medio Marino.*, n.d.) de Protección del Medio Marino, concretamente mediante el Real Decreto 363/2017 (*BOE-A-2017-3950 Real Decreto 363/2017, de 8 de Abril, Por El Que Se Establece Un Marco Para La Ordenación Del Espacio Marítimo.*, n.d.), que establece un marco para la ordenación del espacio marítimo. Por primera vez en España, se ha llevado a cabo un proceso de ordenación del espacio marítimo, una tarea de gran complejidad que ha requerido la colaboración de todos los departamentos ministeriales con competencias en el ámbito marítimo, así como de las Comunidades Autónomas costeras y los diversos sectores relacionados con el mar.

A continuación, se requiere de un análisis de la existencia de otras actividades marinas que puedan ser descarbonizadas parcial o totalmente como es el caso de: acuicultura, la extracción de sal, la actividad en los puertos etc.

En el caso de la acuicultura, es posible reemplazar la energía empleada en las bombas de agua, los sistemas de calentamiento y enfriamiento, así como en las operaciones de transporte y logística (Scroggins et al., 2022).

Figura 2. Visión Global. Propuesta metodológica. Elaboración propia.



En las salinas, se puede reemplazar la energía utilizada para la extracción, bombeo y tratamiento del agua de mar, así como para los sistemas de calentamiento y evaporación (Mahmoudi et al., 2023).

La actividad portuaria requiere de una gran cantidad de energía, como la iluminación, la operación de grúas y maquinaria portuaria, la refrigeración de almacenes, la carga y descarga de buques etc. (Parhamfar et al., 2023).

Finalmente, en esta fase, se procede a seleccionar la tecnología de aerogenerador para el estudio. Es crucial considerar las turbulencias para cumplir con los estándares de la norma IEC 61400-1 (*UNE-EN IEC 61400-1:2020 Sistemas de Generación de Energía Eóli...*, n.d.) y evaluar la batimetría para determinar si se requiere una cimentación fija o flotante (Manzano-Agugliaro et al., 2020) entre otros aspectos.

2.2 Etapa “Indicadores”

Durante esta etapa del proceso, se procede a calcular los indicadores relevantes para cada una de las alternativas con el fin de establecer un ranking que permita compararlas. Los pasos a seguir se detallan a continuación:

1-El establecimiento del diseño de un parque eólico marino es un proceso multifacético que requiere consideración cuidadosa de varios factores. Inicialmente, se determina la capacidad nominal de la planta, seguido por un análisis exhaustivo de la dirección del viento para asegurar que las alineaciones de los aerogeneradores sean óptimas en relación con la rosa de energía predominante (Gil García, n.d.). Las distancias entre los aerogeneradores son determinadas en función del diámetro del rotor (D) seleccionado durante la fase inicial del proyecto. Se establece que entre las alineaciones de aerogeneradores la distancia debe estar en el rango de 7 a 10 veces D, mientras que entre los aerogeneradores de la misma fila se recomienda mantener una distancia de 3 a 5 veces D (Gil-García et al., 2023). Esta disposición específica ayuda a minimizar el efecto estela, optimizando así el rendimiento general del parque. Es esencial emplear herramientas especializadas, como programas de diseño técnico, para realizar esta distribución de manera precisa. Utilizando capas espaciales en estos programas, se puede visualizar y analizar la disposición tridimensional de los aerogeneradores, lo que facilita la toma de decisiones y la optimización del diseño del parque eólico marino. Se crea una malla de polígonos que cubre exhaustivamente la zona potencial, asegurando una cobertura completa y detallada para el análisis posterior. Este enfoque permite explorar todas las posibles ubicaciones dentro del área de estudio y facilita la evaluación comparativa de las distintas alternativas.

2- Durante la generación de la matriz de decisión, se definen los criterios de selección que caracterizan a cada alternativa, abarcando aspectos técnicos, económicos y ambientales. Entre los criterios recomendados se encuentran:

- Energía eléctrica generada anualmente: Este criterio evalúa la cantidad de energía eléctrica que se espera producir cada año con cada alternativa. Es un indicador clave de la capacidad de generación de energía del proyecto (Gil-García et al., 2024).
- Pérdidas por efecto estela: Este criterio considera las pérdidas de eficiencia causadas por el efecto estela entre los aerogeneradores. Un menor efecto estela indica una disposición más eficiente de los aerogeneradores y, por lo tanto, una menor pérdida de energía (Gil-García et al., 2023).
- Costos de inversión (Capex): Se refiere a los costos asociados con la inversión inicial en la infraestructura del parque eólico, incluyendo la compra e instalación de equipos y la construcción de la infraestructura necesaria (Huang et al., 2019).
- Costos de mantenimiento (Opex): Este criterio evalúa los costos operativos y de mantenimiento esperados durante la vida útil del parque eólico, incluyendo reparaciones, inspecciones regulares y costos de operación.

- Emisiones evitadas: Este criterio cuantifica las emisiones de gases de efecto invernadero u otros contaminantes que se esperan evitar mediante la generación de energía renovable en lugar de fuentes de energía convencionales.

El cálculo de la energía eléctrica vertida a la red es un proceso complejo que puede realizarse mediante ecuaciones generales, aunque se recomienda el uso de programas especializados en el sector eólico. Estos programas pueden proporcionar análisis detallados y precisos teniendo en cuenta una variedad de factores, como la velocidad del viento, la densidad del aire y las características específicas del diseño del parque eólico (Argin & Yerci, 2017).

3- La elaboración de un ranking de alternativas basado en los indicadores del paso anterior es un procedimiento complejo que suele abordarse mediante métodos de evaluación multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés)(Sánchez-Lozano et al., 2022). Estos métodos son ampliamente utilizados y presentan numerosas variantes para su aplicación.

En términos generales, el proceso comienza con la definición de los pesos relativos de los distintos factores o criterios utilizados en la evaluación (Caceoğlu et al., 2022). Posteriormente, se procede a establecer un ranking de las alternativas en función de estos pesos y los valores obtenidos para cada criterio (Tian et al., 2023). Por ejemplo, el método Entropía se utiliza para determinar los pesos relativos de los criterios, permitiendo a los tomadores de decisiones asignar importancia a cada uno de ellos en relación con los demás. Una vez que se han establecido estos pesos, la técnica TOPSIS se emplea para ordenar las alternativas en función de su proximidad a la solución ideal y su lejanía de la solución anti-ideal, considerando así tanto los aspectos positivos como los negativos de cada alternativa (Vagiona et al., 2022).

2.3 Etapa “Resultados”

Considerando el ranking de alternativas y los objetivos establecidos en cuanto a la capacidad de instalación de energía eólica marina, se han delineado diversos escenarios a corto, medio y largo plazo. Estos escenarios proponen una asignación variada de la energía eléctrica, según las necesidades de consumo de distintos sectores marítimos. Es crucial destacar que estos sectores deben comprometerse a actualizar sus tecnologías, con un enfoque unificado hacia un objetivo fundamental: la descarbonización de las actividades económicas relacionadas con el mar. Este enfoque es crucial para reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y alinear las acciones con los objetivos del desarrollo sostenible, especialmente los números 7, 9 y 13.

En el corto plazo, es importante priorizar la transición hacia fuentes de energía más limpias en los sectores marítimos de alta emisión, como el transporte marítimo y la industria pesquera. Estos sectores pueden beneficiarse enormemente de la adopción de tecnologías impulsadas por energía eléctrica, reduciendo así su huella de carbono. Además, la electrificación de los puertos y las instalaciones portuarias puede ayudar a disminuir significativamente las emisiones locales.

En el mediano plazo, se deben enfocar los esfuerzos en la expansión y optimización de la infraestructura necesaria para la generación y distribución de energía eólica marina. Esto implica el desarrollo de parques eólicos marinos más eficientes y la mejora de la capacidad de almacenamiento y transmisión de energía eléctrica. Al mismo tiempo, es crucial promover la investigación y el desarrollo de tecnologías innovadoras que aumenten la rentabilidad y la sostenibilidad de la energía eólica marina.

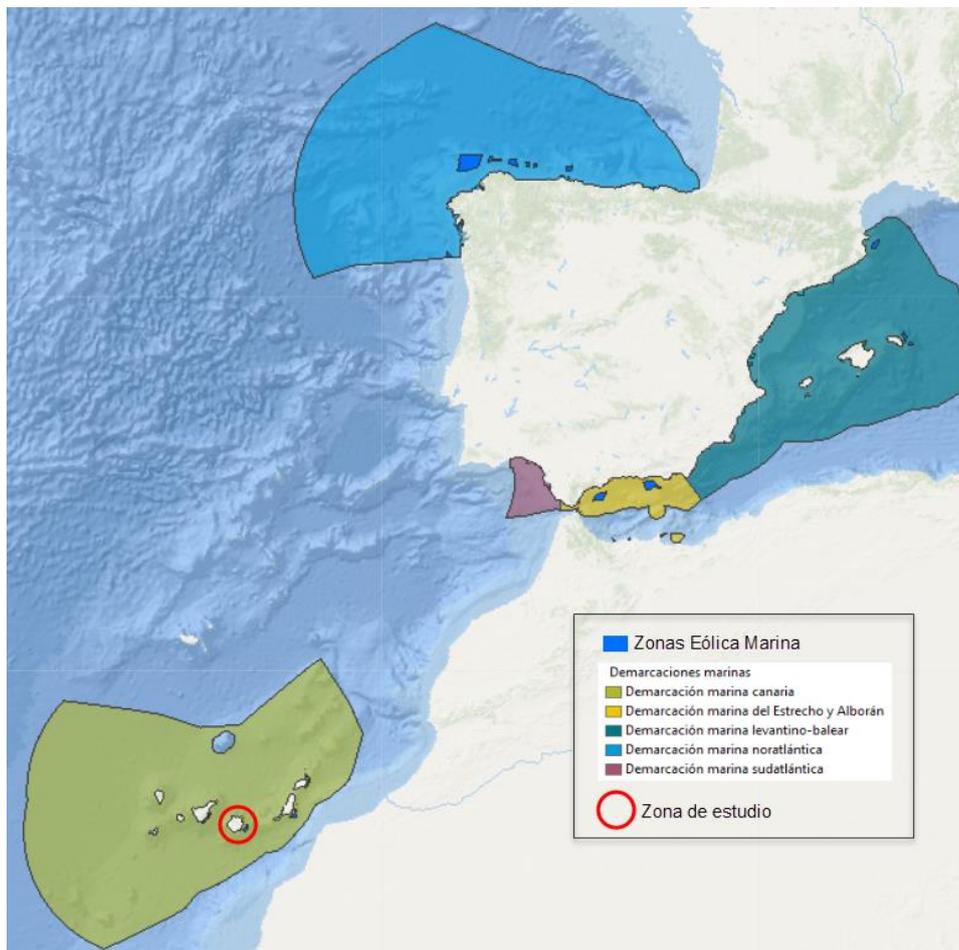
A largo plazo, el objetivo último es lograr una completa descarbonización de los sectores marítimos, garantizando que todas las actividades económicas relacionadas con el mar funcionen con fuentes de energía renovable y sostenible. Esto requerirá una colaboración estrecha entre los gobiernos, las empresas y la sociedad civil, así como inversiones

significativas en infraestructura y capacitación. Además, será necesario implementar políticas y regulaciones que fomenten la adopción de prácticas sostenibles y desincentiven el uso de combustibles fósiles.

3. Caso de estudio

El caso de estudio se centra en España, los Planes de Ordenación del Espacio Marítimo se encuentran dentro de la Hoja de Ruta de la energía eólica marina y otras fuentes de energía provenientes del mar. Para la energía eólica marina, se ha identificado un área potencial de 5140 km² distribuidos entre las cinco demarcaciones marinas españolas: Noratlántica, Levantino Balear, Estrecho y Alborán, Sudatlántica y Canarias, ver Figura 3.

Figura 3. Zonas de eólica marina en España. POEM (Visor INFOMAR - MITECO, CEDEX, n.d.)



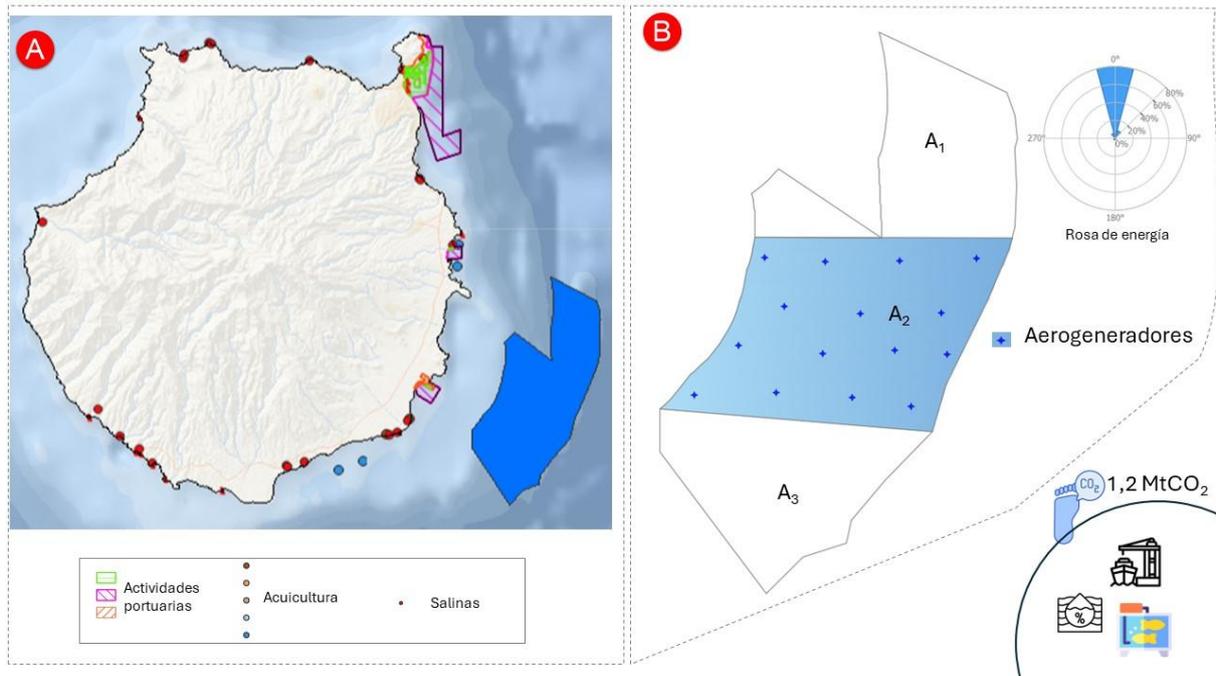
En particular, la demarcación marina de Canarias se utiliza para evaluar la propuesta. Se identifican varias actividades con potencial de descarbonización: acuicultura, salinas y actividades portuarias, ver Figura 4A. Se lleva a cabo un análisis estadístico descriptivo de la zona y, según el nivel de turbulencia, se selecciona un aerogenerador de 15 MW de potencia nominal (Schwartz et al., 2009). Se diseña un prototipo de planta eólica con una capacidad de 225 MW, considerando la dirección predominante de la rosa de energía y las distancias entre alineaciones y aerogeneradores. Se generan tres alternativas en la zona potencial (ver Figura 4B).

Se utilizan varios criterios de selección: batimetría (m), altura de las olas (m), área (m²), distancia al puerto (km), generación de electricidad (GWh), pérdidas por efecto estela (%),

CAPEX (€) y OPEX (€). Se emplea la combinación de los métodos Entropía y TOPSIS para establecer un ranking de alternativas. La mejor alternativa (A_2) genera 1205 GWh con un 2% de pérdidas por efecto estela y un CAPEX de 1,7 millones de euros.

A corto plazo, destinando el 40%, 25%, 20% y el 15% de la generación para actividades portuarias, acuicultura, salinas e inyección a la red, respectivamente, se evitan 1,2 millones de toneladas de CO_2 .

Figura 4. Zonas potenciales a descarbonizar (A). Alternativas generadas. A_2 mejor alternativa (B). Elaboración propia.



4. Conclusiones

El entorno marítimo es un crisol de actividades económicas diversas, algunas arraigadas en la tradición y otras emergentes con un potencial transformador. La evolución de la energía eólica marina es un ejemplo destacado de cómo la innovación y la conciencia ambiental están dando forma al futuro de las actividades económicas en el mar. Sin embargo, el camino hacia la sostenibilidad en el entorno marítimo requiere un enfoque integral que aborde los desafíos específicos de cada actividad, al tiempo que promueva un desarrollo económico equitativo y respetuoso con el medio ambiente.

Este trabajo propone una solución práctica para reducir la huella de carbono en el ámbito de las actividades marinas mediante la energía eólica marina, abordada en tres fases. Primero, la identificación de áreas potenciales para generar y recibir energía limpia; segundo, el cálculo de indicadores que determinen la mejor alternativa; y, por último, la planificación de escenarios a corto, medio y largo plazo. La zona marina de Canarias, en España, se selecciona como área de estudio para evaluar la metodología. Se estima que, con una planta eólica de 225 MW de capacidad, es posible evitar la emisión de 1,2 millones de toneladas equivalentes de CO_2 .

Como perspectiva futura, se propone optimizar las emisiones de CO_2 evitadas mediante la integración de la electricidad generada por la energía eólica marina con otras actividades marinas, en línea con el compromiso de España de alcanzar una capacidad total instalada de 3 GW para el año 2030.

5. Referencias

- Arent, D. J., Green, P., Abdullah, Z., Barnes, T., Bauer, S., Bernstein, A., Berry, D., Berry, J., Burrell, T., Carpenter, B., Cochran, J., Cortright, R., Curry-Nkansah, M., Denholm, P., Gevorian, V., Himmel, M., Livingood, B., Keyser, M., King, J., ... Turchi, C. (2022). Challenges and opportunities in decarbonizing the U.S. energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112939. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112939>
- Argin, M., & Yerci, V. (2017). Offshore wind power potential of the Black Sea region in Turkey. *International Journal of Green Energy*, 14(10), 811–818. <https://doi.org/10.1080/15435075.2017.1331443>
- BOE-A-2010-20050 Ley 41/2010, de 29 de diciembre, de protección del medio marino. (n.d.). Retrieved March 25, 2024, from <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2010-20050>
- BOE-A-2017-3950 Real Decreto 363/2017, de 8 de abril, por el que se establece un marco para la ordenación del espacio marítimo. (n.d.). Retrieved March 25, 2024, from <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2017-3950>
- BOE.es - DOUE-L-2014-81825 Directiva 2014/89/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de julio de 2014, por la que se establece un marco para la ordenación del espacio marítimo. (n.d.). Retrieved March 25, 2024, from <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2014-81825>
- Boyd, C. E., D'Abramo, L. R., Glencross, B. D., Huyben, D. C., Juarez, L. M., Lockwood, G. S., McNevin, A. A., Tacon, A. G. J., Teletchea, F., Tomasso, J. R., Tucker, C. S., & Valenti, W. C. (2020). Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(3), 578–633. <https://doi.org/10.1111/JWAS.12714>
- Caceoğlu, E., Yildiz, H. K., Oğuz, E., Huvaj, N., & Guerrero, J. M. (2022). Offshore wind power plant site selection using Analytical Hierarchy Process for Northwest Turkey. *Ocean Engineering*, 252, 111178. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2022.111178>
- Chien, F., Hsu, C. C., Ozturk, I., Sharif, A., & Sadiq, M. (2022). The role of renewable energy and urbanization towards greenhouse gas emission in top Asian countries: Evidence from advance panel estimations. *Renewable Energy*, 186, 207–216. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.12.118>
- Esteban, M. D., Diez, J. J., López, J. S., & Negro, V. (2011). Why offshore wind energy? *Renewable Energy*, 36(2), 444–450. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2010.07.009>
- Gil García, I. Cristina. (n.d.). *Energía eólica*. Retrieved March 26, 2024, from <https://www.casadellibro.com/libro-energia-eolica/9788445445921/14066103>
- Gil-García, I. C., Fernández-Guillamón, A., García-Cascales, M. S., Molina-García, A., & Dagher, H. (2024). A green electrical matrix-based model for the energy transition: Maine, USA case example. *Energy*, 290, 130246. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2024.130246>
- Gil-García, I. C., García-Cascales, M. S., Fernández-Guillamón, A., & Molina-García, A. (2019). Categorization and Analysis of Relevant Factors for Optimal Locations in Onshore and Offshore Wind Power Plants: A Taxonomic Review. *Journal of Marine Science and Engineering* 2019, Vol. 7, Page 391, 7(11), 391. <https://doi.org/10.3390/JMSE7110391>
- Gil-García, I. C., Ramos-Escudero, A., García-Cascales, M. S., Dagher, H., & Molina-García, A. (2022). Fuzzy GIS-based MCDM solution for the optimal offshore wind site selection:

- The Gulf of Maine case. *Renewable Energy*, 183, 130–147.
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.10.058>
- Gil-García, I. C., Ramos-Escudero, A., Molina-García, Á., & Fernández-Guillamón, A. (2023). GIS-based MCDM dual optimization approach for territorial-scale offshore wind power plants. *Journal of Cleaner Production*, 428, 139484.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.139484>
- Global Wind Report 2023 - Global Wind Energy Council*. (n.d.). Retrieved March 25, 2024, from <https://gwec.net/globalwindreport2023/>
- Huang, Q., Wang, X., Fan, J., Zhang, X., & Wang, Y. (2019). Reliability and economy assessment of offshore wind farms. *The Journal of Engineering*, 2019(16), 1554–1559.
<https://doi.org/10.1049/JOE.2018.8472>
- Kronfeld-Goharani, U. (2018). Maritime economy: Insights on corporate visions and strategies towards sustainability. *Ocean & Coastal Management*, 165, 126–140.
<https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2018.08.010>
- Mahmoudi, A., Bostani, M., Rashidi, S., & Valipour, M. S. (2023). Challenges and opportunities of desalination with renewable energy resources in Middle East countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 184, 113543.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.113543>
- Manzano-Agugliaro, F., Sánchez-Calero, M., Alcayde, A., San-Antonio-gómez, C., Perea-Moreno, A. J., & Salmeron-Manzano, E. (2020). Wind Turbines Offshore Foundations and Connections to Grid. *Inventions 2020, Vol. 5, Page 8*, 5(1), 8.
<https://doi.org/10.3390/INVENTIONS5010008>
- McKay, D. I. A., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S. E., Rockström, J., & Lenton, T. M. (2022). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377(6611).
https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABN7950/SUPPL_FILE/SCIENCE.ABN7950_DATA_S1.ZIP
- Megura, M., & Gunderson, R. (2022). Better poison is the cure? Critically examining fossil fuel companies, climate change framing, and corporate sustainability reports. *Energy Research & Social Science*, 85, 102388. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102388>
- Okeke, A. (2021). Towards sustainability in the global oil and gas industry: Identifying where the emphasis lies. *Environmental and Sustainability Indicators*, 12, 100145.
<https://doi.org/10.1016/J.INDIC.2021.100145>
- Parhamfar, M., Sadeghkhani, I., & Adeli, A. M. (2023). Towards the application of renewable energy technologies in green ports: Technical and economic perspectives. *IET Renewable Power Generation*, 17(12), 3120–3132. <https://doi.org/10.1049/RPG2.12811>
- Salkuti, S. R. (2022). Emerging and Advanced Green Energy Technologies for Sustainable and Resilient Future Grid. *Energies 2022, Vol. 15, Page 6667*, 15(18), 6667.
<https://doi.org/10.3390/EN15186667>
- Sánchez-Lozano, J. M., Ramos-Escudero, A., Gil-García, I. C., García-Cascales, M. S., & Molina-García, A. (2022). A GIS-based offshore wind site selection model using fuzzy multi-criteria decision-making with application to the case of the Gulf of Maine. *Expert Systems with Applications*, 210, 118371. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2022.118371>
- Schwartz, M., Heimiller, D., Haymes, S., & Musial, W. (2009). *Assessment of Offshore Wind Energy Resources for the United States*. <http://www.osti.gov/bridge>

- Scroggins, R. E., Fry, J. P., Brown, M. T., Neff, R. A., Asche, F., Anderson, J. L., & Love, D. C. (2022). Renewable energy in fisheries and aquaculture: Case studies from the United States. *Journal of Cleaner Production*, 376, 134153. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.134153>
- The Evolution of Energy Efficiency Policy to Support Clean Energy Transitions – Analysis - IEA*. (n.d.). Retrieved March 18, 2024, from <https://www.iea.org/reports/the-evolution-of-energy-efficiency-policy-to-support-clean-energy-transitions>
- Tian, S., Zhou, Y., Fu, Y., Ji, L., & Li, Z. (2023). Comprehensive Cost-Benefit Assessment of Offshore Wind Power Based on Improved VIKOR Method. *2023 IEEE IAS Industrial and Commercial Power System Asia, I and CPS Asia 2023*, 1268–1273. <https://doi.org/10.1109/ICPSASIA58343.2023.10294841>
- UNE-EN IEC 61400-1:2020 Sistemas de generación de energía eóli...* (n.d.). Retrieved March 25, 2024, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063447>
- Vagiona, D. G., Tzekakis, G., Loukogeorgaki, E., & Karanikolas, N. (2022). Site Selection of Offshore Solar Farm Deployment in the Aegean Sea, Greece. *Journal of Marine Science and Engineering* 2022, Vol. 10, Page 224, 10(2), 224. <https://doi.org/10.3390/JMSE10020224>
- Visor *INFOMAR - MITECO, CEDEX*. (n.d.). Retrieved March 27, 2024, from <https://infomar.miteco.es/visor.html>
- Weiss, C. V. C., Guanche, R., Ondiviela, B., Castellanos, O. F., & Juanes, J. (2018). Marine renewable energy potential: A global perspective for offshore wind and wave exploitation. *Energy Conversion and Management*, 177, 43–54. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.09.059>
- Xie, F., Liu, Y., Guan, F., & Wang, N. (2020). How to coordinate the relationship between renewable energy consumption and green economic development: from the perspective of technological advancement. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/S12302-020-00350-5/TABLES/7>
- Xu, Y., Li, Y., Zheng, L., Cui, L., Li, S., Li, W., & Cai, Y. (2020). Site selection of wind farms using GIS and multi-criteria decision making method in Wafangdian, China. *Energy*, 207, 118222. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.118222>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

