



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE AEROGENERADORES EN ALTA MAR

Autor: Gabriela Martínez Fernández-Valdés

Director: Jaime Navarro Ocón

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Producción de energía eólica mediante aerogeneradores en alta mar
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Gabriela Martínez Fernández-Valdés Fecha: ...29.../ ...Junio.../ ...2022...



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Jaime Navarro Ocón Fecha: ...29.../ ...Junio.../ ...2022...





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE AEROGENERADORES EN ALTA MAR

Autor: Gabriela Martínez Fernández-Valdés

Director: Jaime Navarro Ocón

Madrid

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE AEROGENERADORES EN ALTA MAR

Autor: Martínez Fernández-Valdés, Gabriela.

Director: Navarro Ocón, Jaime.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El imparable crecimiento del consumo ha provocado un incremento en la demanda de la energía, sumergiendo a la sociedad en una gran crisis energética. Además, la invasión de Rusia ha dejado en evidencia la dependencia energética entre países y la dependencia de combustibles fósiles. Este proyecto propone como posible avance para lograr solucionar la crisis, la instalación de un parque eólico en las costas del Mar Cantábrico.

Palabras clave: Offshore, aerogenerador, energía, flotante.

1. Introducción

La sociedad se encuentra sumergida en una gran crisis energética. El constante crecimiento económico supone un incremento en la demanda de la energía. Por otro lado, las formas más tradicionales con las que se extrae la energía son ilimitadas y provocan enormes daños en la sociedad y el medio ambiente. La actividad humana está sobrecargando la atmósfera con dióxido de carbono y emisiones de otros gases que están provocando el calentamiento global, alcanzando en todo el planeta condiciones meteorológicas extremas.

La invasión de Rusia a Ucrania juega un papel muy importante en el mercado global de la energía. En el año 2021, la Unión Europea importó de Rusia una cantidad de más de 380 millones de metros cúbicos de gas diariamente. En total, la cantidad importada por Rusia representó alrededor del 45% de las importaciones que se realizaron en la Unión Europea en 2021. Como consecuencia, se ha visto que la necesidad de recurrir a otras fuentes de energía es imprescindible, no solo para evitar el calentamiento global, sino para romper la dependencia energética con otros países como es el caso de Rusia.

Cabe destacar, que el crecimiento de las energías renovables es evidente. No obstante, la cantidad de energía producida de forma renovable no es capaz de mantener el ritmo de crecimiento de la demanda energética, por lo que los combustibles fósiles siguen siendo necesarios. A pesar de ello, las energías renovables son la única opción que se tiene para

luchar contra la crisis energética. La Unión Europea ha propuesto que para el 2030 las energías renovables ocupen el 40% de la energía total producida. En España, los combustibles fósiles siguen siendo imprescindibles para el desarrollo de la economía. Sin embargo, las tecnologías renovables crecen sin parar. En 2020, la energía eólica se ha convertido en la segunda fuente de generación eléctrica en España, convirtiéndose en el quinto país del mundo por potencia eólica instalada.

Como se ha mencionado, España ya es un país líder en energía eólica terrestre, pero otros países están recurriendo a una nueva alternativa de eólica alcanzando una mayor eficacia y rendimiento: la energía eólica marina.

2. Definición del proyecto

El proyecto realizado consiste en un primer análisis sobre la crisis energética en la que se encuentra sumergida la sociedad. Se analizará la situación actual de la distribución de las distintas fuentes de energía a nivel mundial y en España.

A continuación, se presenta el crecimiento que han desarrollado las energías renovables y cómo solo ellas pueden acabar con la crisis energética. Se presenta por ello, la viabilidad de convertir a España en un referente en la energía eólica marina flotante, estudiando la viabilidad de instalar un parque eólico en las costas del Mar Cantábrico.

Finalmente, en vista del aún escaso desarrollo de la eólica flotante, un análisis económico presenta una enorme complejidad y está sujeto a una gran incertidumbre. Por esta razón, se ha analizado los costes que se deben tener en cuenta a la hora de desarrollar un proyecto de un parque eólico en alta mar.

3. Desarrollo del proyecto

En primer lugar, para poder realizar el primer estudio sobre la situación actual energética y en concreto de la eólica marina, se ha llevado a cabo una exhausta recopilación de información y noticias sobre el tema. Además, se han recopilado datos sobre la situación actual en España de la eólica marina durante la asistencia al seminario del Instituto de Ingeniería de España en el mes de marzo. Durante el seminario participó un representante de la OME (Planes de Ordenación del Espacio Marítimo), la Asociación Empresarial de Eólica (AEE), la empresa energética Iberdrola y un representante del ministerio de transición para hablar de la Hoja de Ruta de la Eólica en España.

A continuación, se estudió la posibilidad de ubicar el parque en el norte de España. Para ello, se han considerado factores como el marco legal (espacios protegidos, zonas militares, tráfico marítimo, políticas territoriales). Otro factor determinante en la instalación del parque propuesto es la batimetría. Debido a las limitaciones que presenta la eólica marina en España en cuanto a las profundidades del mar, en este proyecto se ha propuesto el uso de una nueva tecnología: la eólica marina flotante. Para el estudio de las profundidades del mar se ha recurrido al portal Emodnet.

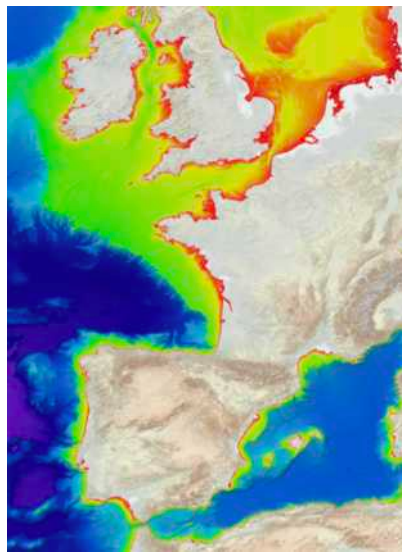


Ilustración 1. Mapa batimétrico (Emodnet)

El oleaje y el recurso eólico de la zona son los factores más determinantes a la hora de elegir la ubicación para alcanzar la mayor eficiencia. Debido al escaso conocimiento de la eólica marina flotante, se han analizado las condiciones de los pocos parques que existen con esta tecnología para determinar la ubicación exacta. Los datos de viento se han obtenido de WindFinder, a través del cual es posible extraer datos eólicos a distintas alturas. Además, la empresa Scottish Power facilita numerosa documentación sobre los parques eólico que ha instalado, por lo que se han utilizado como guía.

4. Resultados

- Las emisiones ocultas de la construcción de turbinas eólicas son muy pequeñas en comparación con los ahorros de migrar de combustibles fósiles.
- El mercado de la energía eólica marina creció aproximadamente un 30%, con la consiguiente reducción de sus costes, y España no puede quedarse atrás.

- La energía eólica marina fija es prácticamente imposible de llevar a cabo en las costas españolas ya que se alcanza una profundidad mayor a los 50 metros nada más alejarse de la costa.
- Disponibilidad de proveedores nacionales de plataformas flotantes.
- Recurso eólico es el adecuado: alrededor de los 8 m/s.
- Energía producida de 264384 MWh.
- Ingresos de la venta de energía de 739.81 M€.
- Costes totales de 231.66
- Beneficio neto de 340 millones de euros
- Acercar el parque de la costa no es tan rentable.

5. Conclusiones

Introducir nuevas tecnologías para la producción de energía, como es la eólica marina, es la única solución para alcanzar el objetivo establecido por la UE y salir de la crisis energética. Además, gracias a la aparición de la eólica marina flotante, instalar un parque eólico offshore es posible en las costas españolas, y en concreto, en las costas asturianas.

POTENTIAL AND ENERGY PRODUCTION OF AN OFFSHORE WINDFARM

Author: Martínez Fernández-Valdés, Gabriela.

Supervisor: Navarro Ocón, Jaime.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The unstoppable growth in consumption has led to an increase in energy demand, plunging society into a major energy crisis. In addition, the invasion of Russia has highlighted the energy dependence between countries and the dependence on fossil fuels. This project proposes the installation of a wind farm off the coast of the Cantabria Sea, as a possible way to solve the crisis.

Keywords: Offshore, turbine, platform, floating.

1. Introduction

Society is in the midst of a major energy crisis. The continuous economic growth means an increase in the demand of energy. On the other hand, the more traditional ways in which energy is extracted are limitless and cause enormous damage to society and the environment. Human activity is overloading the atmosphere with carbon dioxide and other gas emissions that are causing global warming, reaching extreme weather conditions all over the planet.

Russia's invasion of Ukraine plays a major role in the global energy market. In 2021, the European Union imported from Russia an amount of more than 380 million cubic meters of gas daily. In total, the amount imported by Russia accounted for about 45% of the imports into the European Union in 2021. Therefore, it has been seen that the need to resort to other energy sources is essential, not only to avoid global warming, but also to break the energy dependence with other countries as is the case of Russia.

It should be noted that the growth of renewable energies is evident. However, the amount of energy produced from renewable sources is not able to keep pace with the growth in energy demand, so fossil fuels are still necessary. Despite this, renewable energies are the only option available to combat the energy crisis. The European Union has proposed that by 2030 renewable energies should account for 40% of the total energy produced. In Spain, fossil

fuels are still essential for the development of the economy. However, renewable technologies are growing steadily. In 2020, wind power has become the second largest source of electricity generation in Spain, making it the fifth country in the world in terms of installed wind power capacity.

As mentioned, Spain is already a leading country in onshore wind energy, but other countries are turning to a new wind energy alternative achieving greater efficiency and performance: offshore wind energy.

2. Definition of the project

The project consists of a first analysis of the energy crisis in which society is immersed. The current situation of the distribution of the different energy sources worldwide and in Spain will be analyzed.

Then, the growth that renewable energies have developed and how only they can end the energy crisis is presented. Therefore, the feasibility of turning Spain into a reference in floating offshore wind energy is presented, studying the feasibility of installing a wind farm off the coast of the Cantabrian Sea.

Finally, in view of the still scarce development of floating wind power, an economic analysis presents an enormous complexity and is subject to great uncertainty. For this reason, the costs to be considered when developing an offshore wind farm project have been analyzed.

3. Development of the project

First, to carry out the first study on the current energy situation and specifically on offshore wind, an exhaustive compilation of information and news on the subject has been carried out. In addition, data on the current offshore wind energy situation in Spain was collected during the seminar held by the Spanish Institute of Engineering in March. During the seminar, a representative of the OME (Planes de Ordenación del Espacio Marítimo), the Asociación Empresarial de Eólica (AEE), the energy company Iberdrola and a representative of the Ministry of Transition participated to discuss the Roadmap for Wind Power in Spain.

The possibility of locating the wind farm in northern Spain was then studied. To this end, factors such as the legal framework (protected areas, military zones, maritime traffic, territorial policies) were considered. Another determining factor in the installation of the proposed park is the bathymetry. Due to the limitations of offshore wind in Spain in terms

of sea depths, this project has proposed the use of a new technology: floating offshore wind. The Emodnet portal has been used to study the depths of the sea.

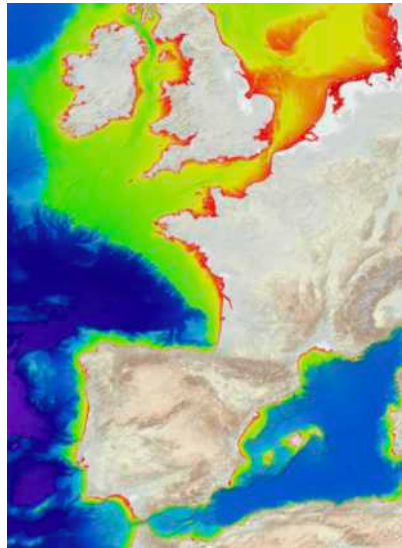


Ilustración 2. Depth of water Emodnet

The waves and the wind resource of the area are the most determining factors when choosing the location to achieve the highest efficiency. Due to the scarce knowledge of floating offshore wind, the conditions of the few existing wind farms with this technology have been analyzed to determine the exact location. Wind data has been obtained from WindFinder, through which it is possible to extract wind data at different heights. In addition, Scottish Power provides extensive documentation on the wind farms it has installed, so they have been used as a guide.

4. Results

- The hidden emissions from the construction of wind turbines are very small compared to the savings from migrating from fossil fuels.
- The offshore wind energy market grew by approximately 30%, with a consequent reduction in costs, and Spain cannot be left behind.
- Fixed offshore wind energy is practically impossible to carry out off the Spanish coast, as it reaches a depth of more than 50 meters as soon as it moves away from the coast.
- Availability of national suppliers of floating platforms.
- Adequate wind resource: around 8 m/s.
- Energy produced of 264,384 MWh.

- Revenues from the sale of energy of €739.81 M.
- Total costs of 231.66
- Net profit of 340 million euros
- Bringing the park closer to the coast is not so profitable.

5. Conclusion

Introducing new technologies for energy production, such as offshore wind power, is the only solution to reach the target set by the EU and overcome the energy crisis. Moreover, thanks to the emergence of floating offshore wind power, it is possible to install an offshore wind farm off the Spanish coast, and in particular, off the coast of Asturias.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Energías renovables	6
1.1 Fuentes de energía disponibles.....	6
1.2 Energías renovables en el mundo	12
1.3 Ventajas energías renovables	15
1.4 Futuro de las energías renovables	18
1.5 Impacto invasión rusa en la energía	23
Capítulo 2. Energía eólica offshore.....	27
2.1 Eólica marina en el mundo.....	29
2.2 Eólica marina en España	33
2.3 Ventajas e inconvenientes de la eólica marina.....	36
Capítulo 3. Tecnología de un parque eólico offshore	39
3.1 Aerogenerador	39
3.2 Estructura fija	41
3.3 Estructura flotante	43
3.4 Posibles mejoras en el aerogenerador	46
Capítulo 4. Estudio localización del parque	48
4.1 Marco legal.....	51
4.2 Batimetría	56
4.3 Oleaje.....	59
4.4 Recurso eólico	62
Capítulo 5. Instalación del parque.....	70
5.1 Fases de instalación	70
5.2 Selección plataforma flotante.....	73
5.3 Consideraciones de diseño de la plataforma TLP	78
5.4 Instalación de la plataforma TLP	79
5.5 Selección del aerogenerador y potencia generada.....	82
Capítulo 6. Análisis económico.....	87
6.1 Costes de inversión.....	87

6.2	Coste instalación.....	88
6.3	Coste de operación y mantenimiento	89
6.4	Coste de desmantelamiento	91
6.5	Estimación de costes	92
6.6	Resumen de costes.....	95
6.7	Ingresos de la venta de energía.....	96
6.8	Amortizaciones.....	96
6.9	Rentabilidad.....	97
6.10	Rentabilidad del parque a menor distancia de la costa.....	99
Capítulo 7. Conclusiones.....		104
Capítulo 8. Objetivos de desarrollo sostenible.....		107
Bibliografía		109

Índice de figuras

Figura 1. Consumo global de energía.....	7
Figura 2. Temperatura global (OurWorldInData)	8
Figura 3. Emisiones de carbono globales	9
Figura 4. Emisiones 2021 frente a 2019 por sector	11
Figura 5. Países con objetivos contra el cambio climático.....	13
Figura 6. Capacidad en energía renovable.....	14
Figura 7. Empleabilidad según tecnología renovable.....	16
Figura 8. Empleabilidad energías renovable por países seleccionados	17
Figura 9. Inversión en renovables a lo largo de los años.....	19
Figura 10. Consumo de energía mundial.....	20
Figura 11. Precios del petróleo a 20/06/2022	21
Figura 12. Origen gas importado.....	24
Figura 13 Socios importadores de gas.....	24
Figura 14. Evolución potencia eólica en el mundo	27
Figura 15. Generación eólica en España	28
Figura 16. Capacidad instalada y proyecciones de futuro	30
Figura 17. Coste por MWh de la eólica marina.....	32
Figura 18. Mapa profundidad de los fondos marinos de Europa.....	35
Figura 19. Diseño de un aerogenerador (RES).....	40
Figura 20. Consumo mundial de energía.....	42
Figura 21. Estructuras flotantes más comunes (Iberdrola)	44
Figura 22. División de aguas españolas.....	48
Figura 23. Zonas protegidas en España	53
Figura 24. Densidad tráfico marítimo en el norte peninsular	54
Figura 25. Densidad tráfico marítimo zona Galicia y Asturias	54
Figura 26. Mapa batimétrico norte peninsular.....	57
Figura 27. Mapa batimétrico costas asturianas.....	57
Figura 28. Perfil de profundidad.....	58

Figura 29. Perfil de profundidad.....	59
Figura 30. Dirección del viento en el norte peninsular.....	60
Figura 31. Previsión oleaje en Eberdeen	61
Figura 32. Variación altura oleaje en el lugar del emplazamiento	61
Figura 33. Mapa de viento norte peninsular	62
Figura 34. Mapa de viento en la zona de emplazamiento	63
Figura 35. Mapa viento a 80 metros de altura	64
Figura 36. Mapa viento a 100 metros de altura	64
Figura 37. Distribución de las áreas con viento medio anual superior a 7,5 m/s, a 80 m de altura	67
Figura 38. Velocidad en las coordenadas seleccionadas	68
Figura 39. . Instalación turbina eólica marina	70
Figura 40. Componentes estructura TLP	75
Figura 41. Plataforma TLP	77
Figura 42. Instalación del GICON TLP.....	80
Figura 43. Proceso instalación plataforma	81
Figura 44. Curva de potencia.....	83
Figura 45. Velocidad media Saint-Brieu	84
Figura 46. Potencia aprovechable a 8 m/s	85
Figura 47. Mantenimiento de una turbina eólica marina [47]	90
Figura 48. Profundidad a 17 kilómetros de Luarca	99
Figura 49. Velocidad viento a 17 kilómetros	99
Figura 50. Resultados proyecto alternativo	102

Índice de tablas

Tabla 1. Coste instalación por tecnología.....	22
Tabla 2. Capacidad y generación de las distintas fuentes renovables en el Reino Unido ...	33
Tabla 3. Zonas aptas según el Plan de Energías Renovables	50
Tabla 4. Distribución velocidad del viento en el territorio español.....	66
Tabla 5. Datos de los principales parques eólicos	67
Tabla 6. Consumo mundial de energía	68
Tabla 7. Especificaciones SG 0.0-167 DD	82
Tabla 8. Datos recogidos por Journal of Marine Science and Engineering,	92
Tabla 9. Costes totales sin el desmantelamiento	95
Tabla 10. Coeficientes y periodos de amortización de los bienes [52]	96
Tabla 11. Cuenta resultados.....	98

Capítulo 1. ENERGÍAS RENOVABLES

1.1 FUENTES DE ENERGÍA DISPONIBLES

Uno de los grandes retos de la sociedad del siglo XXI es lograr un uso sostenible de la energía. El hecho de proporcionar un suministro garantizado de energía limpia que sea alcanzable para todos supone un desafío técnico, social, político y económico que debe abordarse para poder asegurar un crecimiento continuo y sostenible de la sociedad. Todas las sociedades contemporáneas basan su economía en la energía. El crecimiento económico de un país está estrechamente relacionado con la fiabilidad de su estructura energética. La actividad económica es imposible sin políticas adecuadas para el suministro y distribución de energía en sus diversas formas. Un estudio realizado por el Banco Mundial (“Energía”, Julio 2020) afirma esta estrecha relación, y cómo el crecimiento de ambos está vinculado. Cabe destacar que los objetivos de desarrollo sostenible impulsados por la Organización de las Naciones Unidas que reconocen la importancia del entorno natural y de sus recursos para el bienestar humano, fomentan e impulsan a los diferentes gobiernos a garantizar un uso adecuado de la energía.

El aumento y mejora de la eficiencia energética es el pilar principal de la estrategia energética de la Unión Europea durante la última década. La razón de ello es obvia, la mejora de la eficiencia energética es clave para poder reducir las emisiones de los gases producidos por el efecto invernadero, y asegurar así un suministro sostenible de energía y la consiguiente reducción de los costes, estimulando la calidad de vida. Uno de los tres objetivos establecidos por la Unión Europea es lograr un aumento del 20% en la eficiencia energética en los próximos años [1]. Este, junto con otros objetivos que la Unión Europea va planteando, sirven como trampolín para alcanzar un futuro más sostenible. Sin embargo, las mejoras sustanciales en la eficiencia energética siguen siendo un desafío para todos los sectores, incluido el energético, industrial, construcción y agricultura entre otros. Por ello, para alcanzar este objetivo, se necesita de la investigación para poder desarrollar nuevas

tecnologías más eficientes y sostenibles con el medio ambiente, así como de una estrategia que permita introducirlas en el mercado.

A nivel mundial, la mayor parte de la energía que se usa se obtiene de los combustibles fósiles. El petróleo es el más utilizado seguido del carbón, gas y luego la energía hidroeléctrica. En la siguiente imagen, se recoge el consumo mundial de energía primaria con los datos que ofrece OurWorldInData. Se puede observar que los combustibles fósiles representan más del 80% del consumo de energía de nuestro planeta. [2]

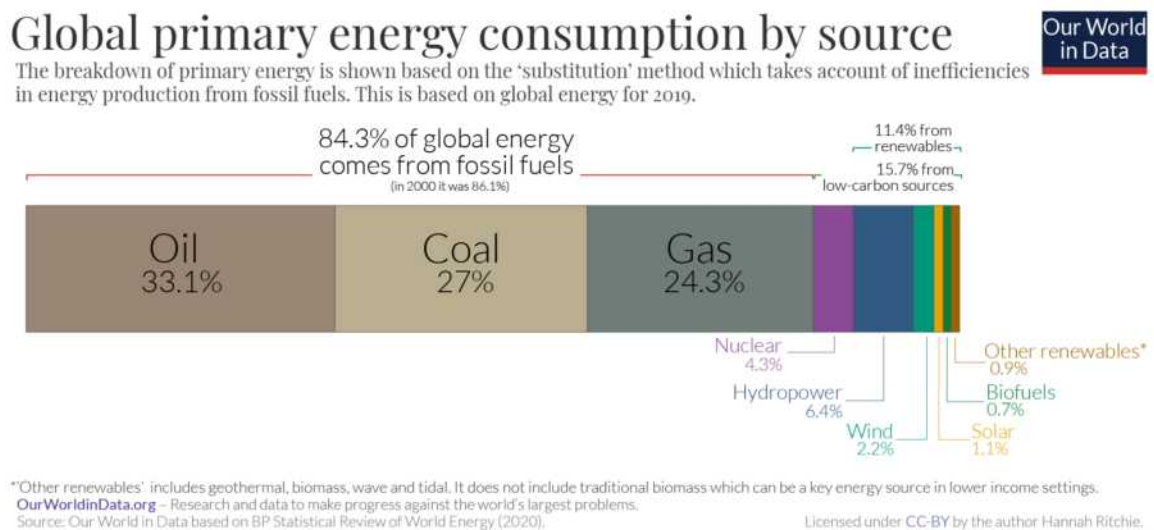


Figura 1. Consumo global de energía

El mundo quiere dejar atrás el uso de combustibles fósiles para dar entrada a la denominada “energía verde”. Sin embargo, la difícil realidad es otra, la presencia de los combustibles contaminantes está lejos de desaparecer. El auge imparable de los combustibles fósiles en el último siglo fue impulsado en gran medida por el rápido crecimiento económico que supuso. Sin embargo, la consecuencia vino todavía más deprisa: el incremento de la atención y preocupación en el impacto del cambio climático.

La actividad humana está sobrecargando la atmósfera con dióxido de carbono y emisiones de otros gases que están provocando el calentamiento global. Estos gases, actúan como una manta, atrapando el calor. Como consecuencia, el resultado de este calentamiento global es una multitud de impactos significativos y dañinos en la Tierra, desde tormentas más potentes

y con mayor frecuencia, hasta sequías, aumentos en el nivel del mar y extinciones de especies de animales. En España, alrededor del 30% de las emisiones que provocan el calentamiento global proceden de combustibles fósiles como el gas natural. El aumento anual de las emisiones de dióxido de carbono, sobre todo en los meses de extremo calor, alarman a los científicos [3].

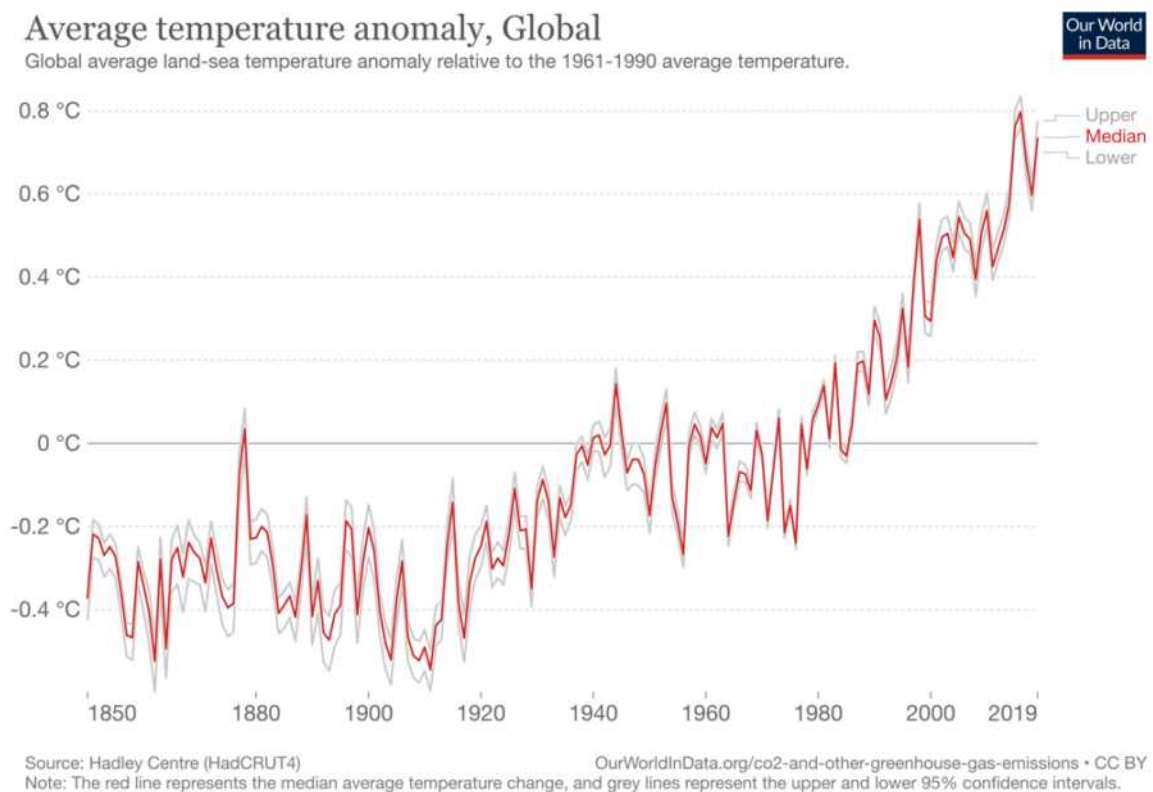


Figura 2. Temperatura global (OurWorldInData)

La gráfica 2 [4] muestra la evolución de la temperatura media de la tierra a lo largo de los años. Se puede observar como en los últimos años el aumento de la temperatura es abismal. La principal razón de este incremento es el continuo uso de combustibles fósiles y la consecuente emisión de dióxido de carbono a la atmósfera. La emisión de gases contaminantes en la atmósfera es uno de los grandes retos de la sociedad de hoy en día. En respuesta, la ONU fundó el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático en 1988 con el objetivo de proporcionar a la sociedad el impacto real que estaba causando el cambio climático, basándose en investigaciones científicas. [5]

La figura 3 muestra Las emisiones de carbono en España durante los últimos años. Es visible el enorme crecimiento que han experimentado las emisiones de carbono a lo largo del siglo XX. Una evaluación preliminar indica que las principales causas de ese incremento fueron la mayor crudeza del invierno en la mayor parte de los países de la UE, que obligó a los hogares a consumir más combustible para calefacción; el aumento de las emisiones generadas por el transporte, y el incremento de la utilización de combustibles fósiles para la producción de electricidad y calor.



Figura 3. Emisiones de carbono globales

Sin embargo, la reducción de emisiones de carbono en España durante los últimos años es evidente. La disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en 2018 respecto del año anterior puede imputarse, en gran parte, a la disminución de la quema de carbón para la generación eléctrica en un 17,8% y del gas natural en las centrales de ciclo combinado en un 21,5%, y al aumento de la producción hidráulica en un 84,8% y de la eólica en un 2,9%. [6]

A pesar de la bajada en las emisiones de carbono en los últimos años, en el año 2021 la situación cambió radicalmente. El mayor crecimiento de emisiones de carbono por sector en

2021 ocurrió en el sector de la electricidad y producción térmica, donde aumentó en más de 900 millones de toneladas (Mt). Esto representó el 46% del aumento global de las emisiones, ya que el uso de todos los combustibles fósiles aumentó para ayudar a satisfacer el crecimiento de la demanda de electricidad. Las emisiones de CO₂ del sector se acercaron a 14,6 Gta., su nivel más alto de la historia y unas 500 Mt más que en 2019. [7]

Las emisiones mundiales de CO₂ procedentes de los sectores de la industria y los edificios volvieron a alcanzar los niveles de 2019, impulsadas por los aumentos tanto en las economías avanzadas como en las de los mercados emergentes y en desarrollo.

El transporte fue el único sector en el que las emisiones globales de CO₂ se mantuvieron muy por debajo de los niveles de 2019. El impacto de la reducción de emisiones de las ventas récord de coches eléctricos en 2021 se vio anulado por el aumento paralelo de las ventas de SUV.[8]

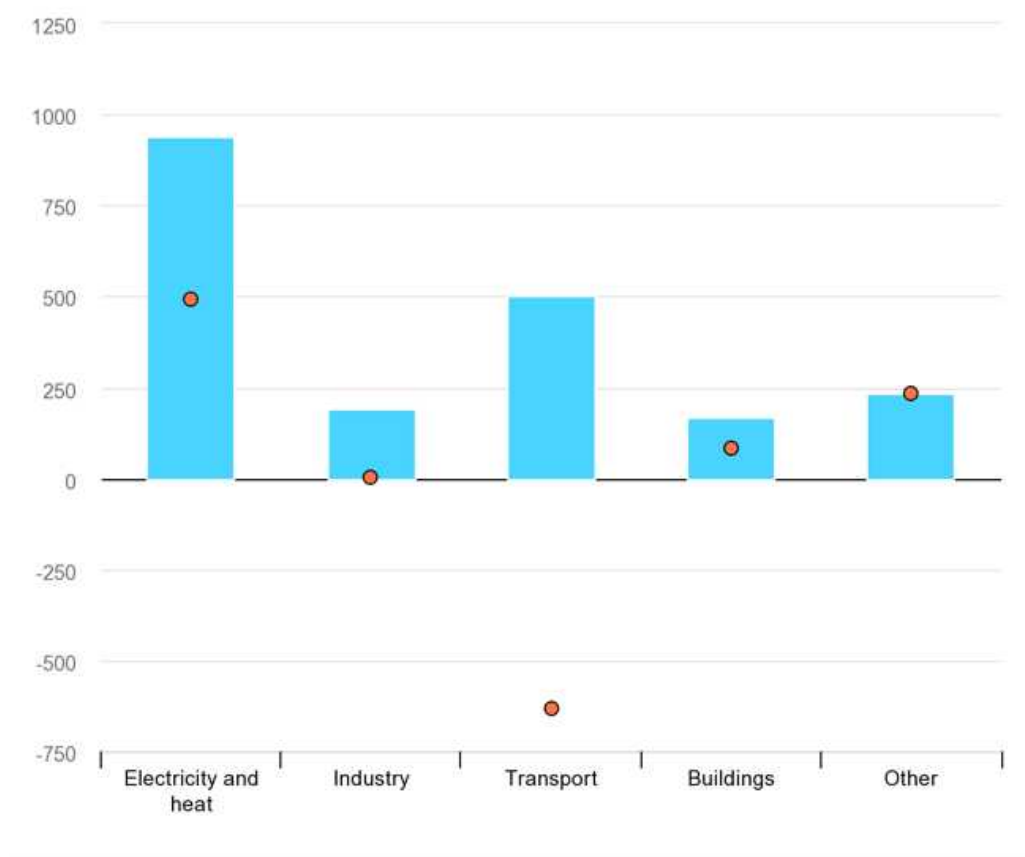


Figura 4. Emisiones 2021 frente a 2019 por sector

El aumento del 6,9% en las emisiones de CO₂ del sector de la electricidad y la calefacción en 2021 se debe al mayor aumento interanual de la demanda mundial de electricidad. Sin las limitaciones de suministro y los elevados precios que afectaron a China e India durante ciertos periodos del año, el uso mundial de carbón para la generación de electricidad en 2021 habría sido aún mayor.

Es evidente que las medidas tomadas para alcanzar los objetivos establecidos son insuficientes y es necesario actuar de forma inmediata para que el daño no sea irreparable. El primer paso hacia un consumo sostenible es el impulso de las energías renovables.

1.2 ENERGÍAS RENOVABLES EN EL MUNDO

La cantidad disponible de fuentes de energía renovable está creciendo, en una sociedad amenazada por el devastador cambio climático. Sin embargo, el crecimiento de las energías renovables es todavía muy pequeño y está muy lejos de la demanda global de energía de hoy en día. Una transición de los combustibles fósiles podrá alcanzarse algún día, pero la cantidad de energía producida de forma renovable no es capaz de mantener el ritmo de crecimiento de la demanda, por lo que los combustibles fósiles siguen siendo necesarios.

A pesar de ello, las energías renovables son el mejor aliado para poder alcanzar el objetivo de convertir el mundo en un lugar más sostenible y amigable con el medio ambiente. La preocupación por el cambio climático y la subida de los precios de los combustibles fósiles, del carbón y del gas ha hecho que los países se propongan objetivos fomentando el uso de las energías renovables. Los objetivos de energía renovable han surgido como un mecanismo para colocar la economía en el camino adecuado para lograr un futuro energético más sostenible y seguro. Desempeñan un papel esencial en el mapa energético mundial, proporcionando una visión general sobre las tendencias de las energías renovables e indicando el despliegue previsto de ellas, ayudando así a fijar las expectativas tanto a corto como a largo plazo. La mayoría de los países centran sus objetivos en el sector de la electricidad. Sin embargo, en los últimos años, el número de países estableciendo objetivos para el sector de la calefacción y refrigeración ha ido aumentando.

En 2005, los 38 países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico eran los únicos con propuestas sobre el fomento de las energías renovables. Sin embargo, en 2015 este número se triplicó.

Como se puede observar en la figura (figura 5), a pesar de que la mayoría de los países apuestan por enfocarse más en el sector eléctrico, cabe destacar que el número de países que establecieron objetivos de energías renovables para el sector de la calefacción y refrigeración ha ido experimentando un crecimiento paulatino en los últimos años, pasando de dos países en 2005 a 47 en 2015. Una de las razones de este crecimiento se puede deber a la

recomendación en el artículo 14 de la Unión Europea 2021/1749 de la Comisión de septiembre de 2021 sobre el principio de “primero, la eficiencia energética” que exige que los estados miembros deben determinar soluciones más eficientes y rentables para responder a las necesidades de calefacción y refrigeración. También se puede observar que el número de países que adoptaron objetivos de transporte renovable también han ido aumentando. [9]

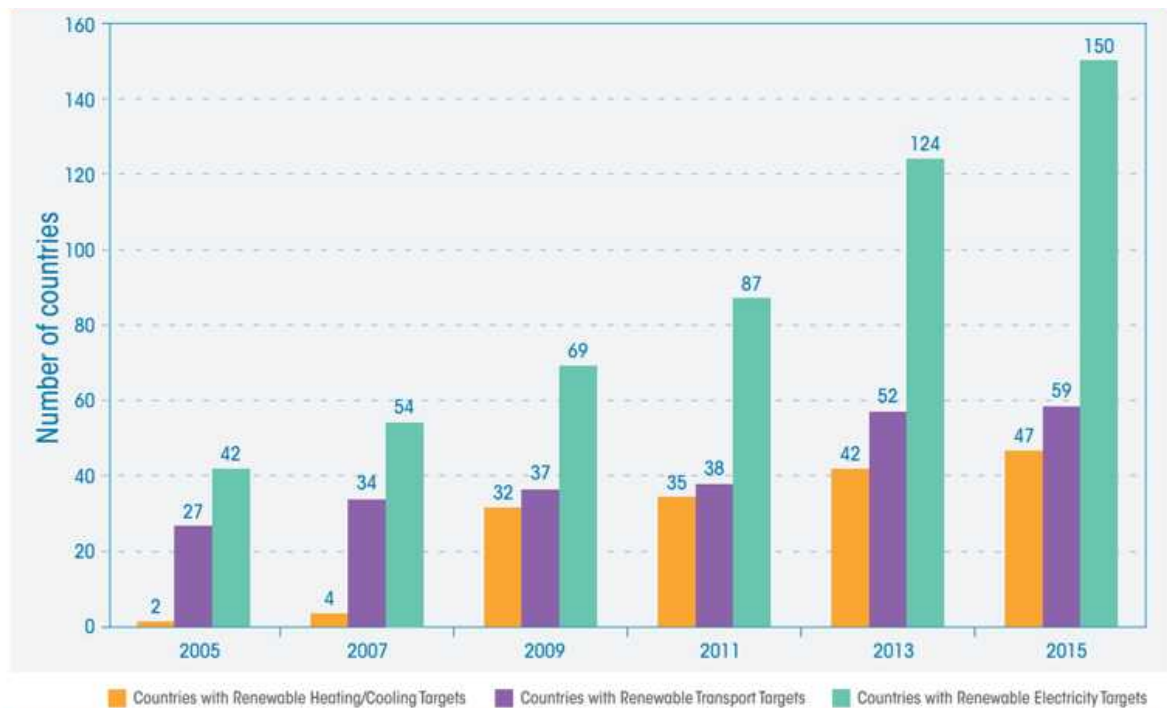


Figura 5. Países con objetivos contra el cambio climático

La Unión Europea ha propuesto que para el 2030 las energías renovables ocupen el 40% de la energía total producida, y promueve la adopción de combustibles renovables, como el hidrógeno verde, en la industria y en los medios de transporte. Cabe destacar que los propósitos que tiene la Unión Europea son demasiado optimistas. La eficacia de los objetivos sobre las energías renovables no sólo depende de su intención, diseño e integración en el mapa político de un país. El compromiso político, el apoyo de socios y accionistas, y la capacidad institucional son factores claves en el éxito de estos.

Según los nuevos datos publicados por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), en el año 2021, el 81% de toda la nueva tecnología instalada durante ese año fueron de origen renovable.

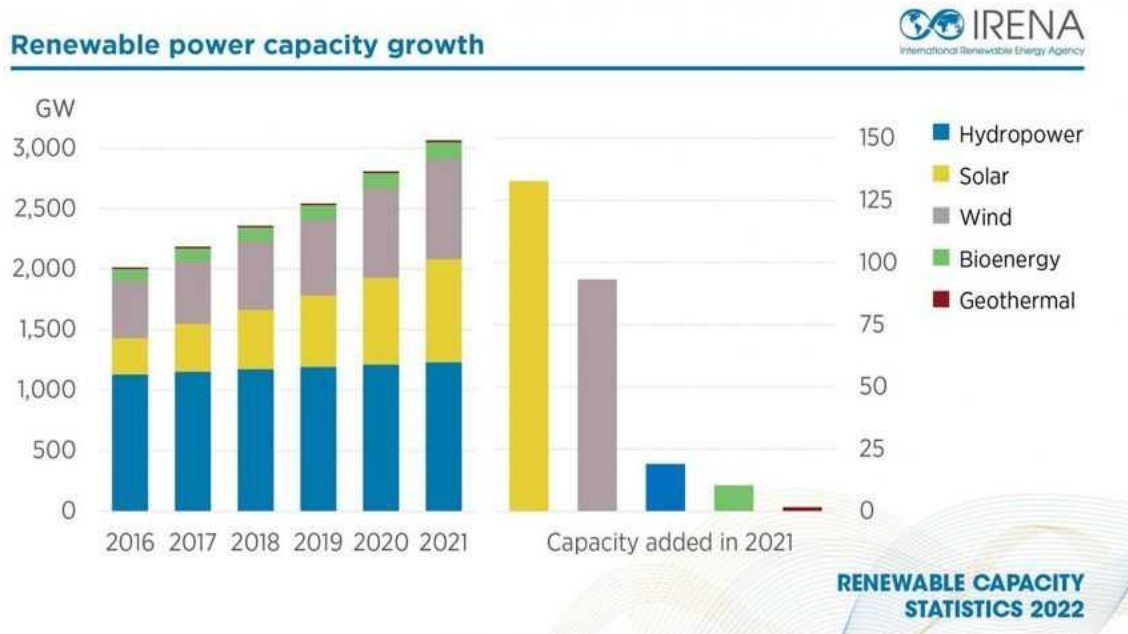


Figura 6. Capacidad en energía renovable

En la gráfica proporcionada con los datos recogidos por la Agencia Internacional de Energías Renovables (Figura 6) se puede observar un claro crecimiento y avance en el desarrollo de las tecnologías para la producción de energías renovables. De manera conjunta, la energía solar y la energía eólica contribuyeron en un 88% en el crecimiento de las energías renovables en el mundo. La energía solar aumentó su capacidad de generación en un 19% y la energía eólica lo hizo en un 13%.

El mercado global de energías renovables está experimentando un rápido aumento de la demanda a medida que los mercados se recuperan de la crisis ocasionada por la pandemia. Según el mánager de Asia Power Analytics en S&P Global Platts, a pesar de la suma que está generando la generación de energía renovable, la cantidad de energía producida hoy en día no es suficiente para alcanzar a la demanda energética mundial.

Conforme a un estudio realizado por la Agencia Internacional de la Energía, la oferta mundial de energía renovable va a crecer en 35 GW desde el año 2021 al 2022, pero la demanda global de energía también va a aumentar, y lo va a hacer en 100 GW en el mismo tiempo. Por ello, los países van a tener que cubrir esa brecha con los tradicionales combustibles fósiles. [10]

1.3 VENTAJAS ENERGÍAS RENOVABLES

Una de las principales ventajas de las energías renovables en comparación con los combustibles fósiles, es que la mayoría de las energías “verdes” producen pocas o ninguna emisión que contribuya al calentamiento global. Incluso cuando se incluyen las emisiones durante el “ciclo de vida” de las energías limpias, es decir aquellas procedentes de los procesos de fabricación, instalación o desmantelamiento, las emisiones asociadas al llamado efecto invernadero son mínimas.

Publicado en la revista Nature Energy, un estudio mide las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de la vida de una variedad de fuentes de energía hasta 2050. Este defiende que la huella de carbono que produce las energías solar, eólica y nuclear es mucho más baja que la que produce el carbón o el gas. Esto es cierto incluso después de considerar las emisiones de la producción, la construcción y el suministro de combustible.

Según los datos recogidos en la investigación, para obtener electricidad la combustión de gas natural libera entre 0.27 y 0.9 kg de dióxido de carbono equivalente por kilovatio-hora, y el carbón emite entre 0.6 y 1.6 kg de CO₂ por kWh. Por otro lado, la energía eólica emite entre 0.009 y 0.018 kg/kWh en su ciclo de vida, la solar entre 0.03 y 0.09; la geotérmica entre 0.045 y 0.09; y la hidroeléctrica entre 0.045 y 0.23. [11]

A pesar de las críticas, las investigaciones más recientes demuestran que las emisiones ocultas de la construcción de turbinas eólicas, paneles solares o plantas de energía nuclear son muy pequeñas en comparación con los ahorros de migrar de combustibles fósiles.

Un estudio realizado por la Universidad de Harvard concluyó que los costes del ciclo de vida del carbón y de los daños que produce en la salud pública alcanzan los 74.600 millones de dólares cada año. Estos efectos en la salud están provocados por la contaminación. Según los datos anteriores, las fuentes de energía renovables producen muy poca contaminación. Además, la energía solar y eólica necesitan muy poca agua para funcionar por lo que no contaminan los recursos hídricos como pueden hacerlo la minería de carbón y todas las centrales térmicas.

Por otro lado, se generan más puestos de trabajo por cada unidad de electricidad producida a partir de fuentes de energías renovables que de combustibles fósiles. Esto se debe a que las tecnologías para la producción de combustibles fósiles están más mecanizadas y requieren de una inversión muy elevada. Las torres, aerogeneradores y paneles solares entre otros necesitan mano de obra para su instalación y mantenimiento. [12]

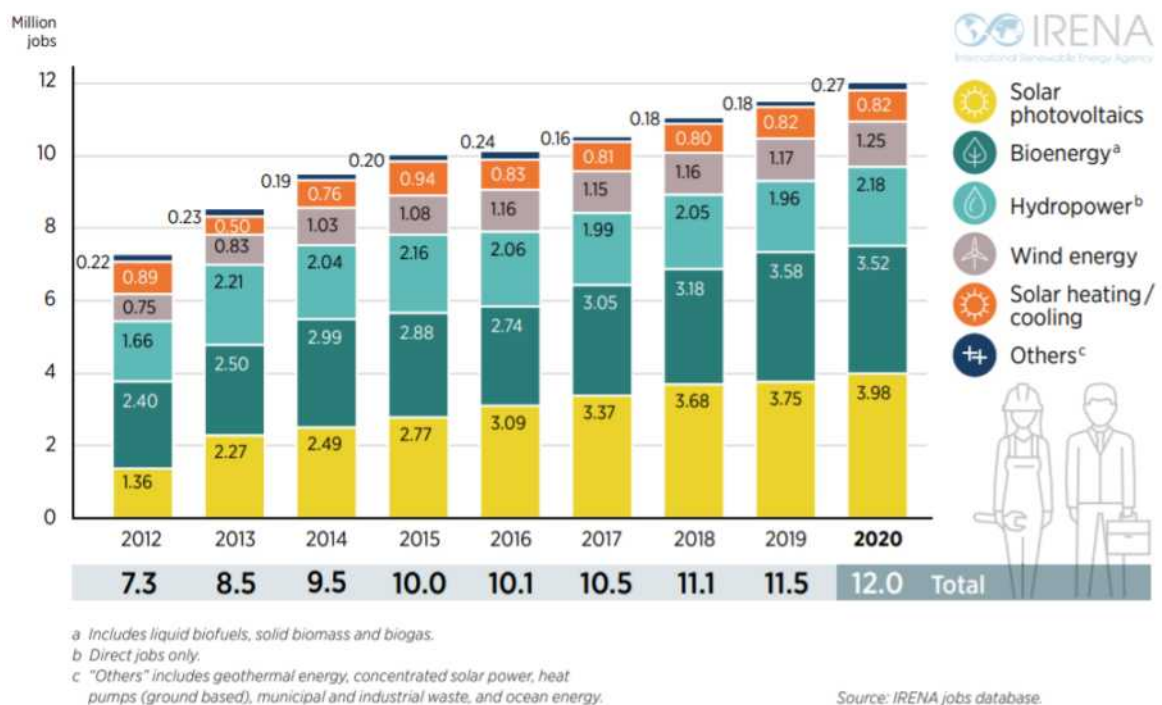


Figura 7. Empleabilidad según tecnología renovable

Según un informe realizado de forma conjunta entre la Agencia Internacional de Energías Renovables y la Organización Internacional del Trabajo, el empleo en energías renovables alcanzó a nivel mundial los 12 millones.

Figure 9: Renewable energy employment in selected countries

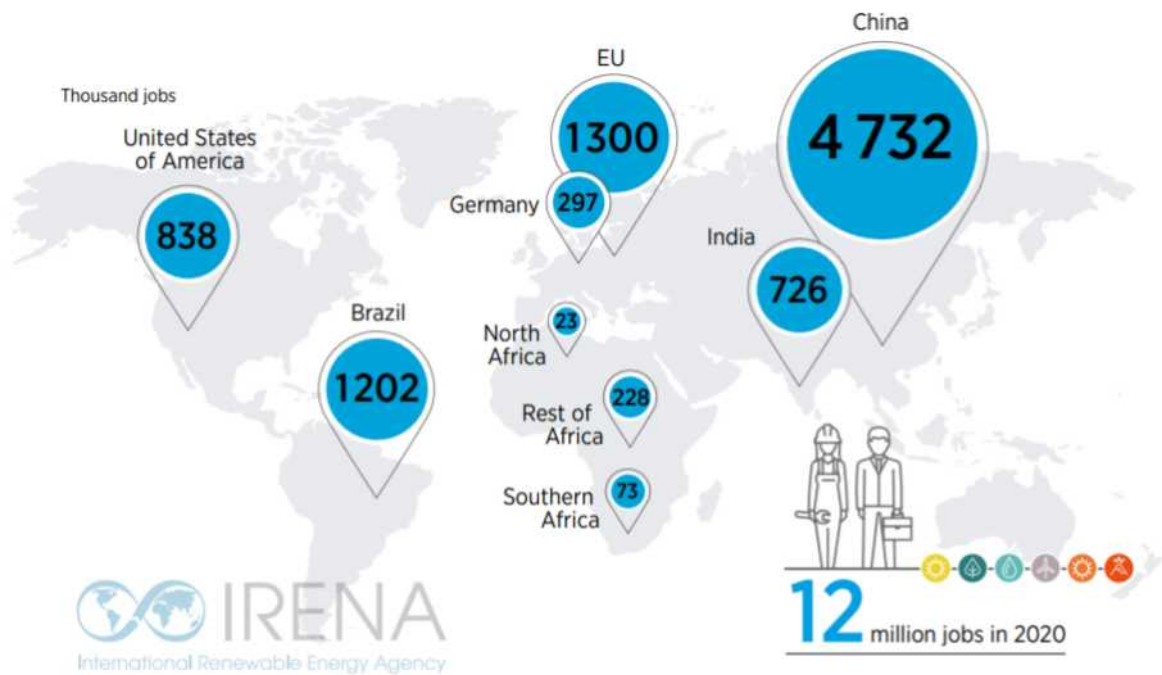


Figura 8. Empleabilidad energías renovable por países seleccionados

China lideró este crecimiento en el que tuvo una participación del 40% de los trabajos de energía renovable en el mundo en el año 2020. Es indudable la capacidad de la industria de las energías renovables para la creación de puestos de trabajo y poder lograr los objetivos climáticos establecidos. Según el director general de IRENA, Francesco la Camera, el único camino a seguir es aumentar las inversiones en una transición justa e inclusiva, obteniendo todos los beneficios socioeconómicos a lo largo del camino.

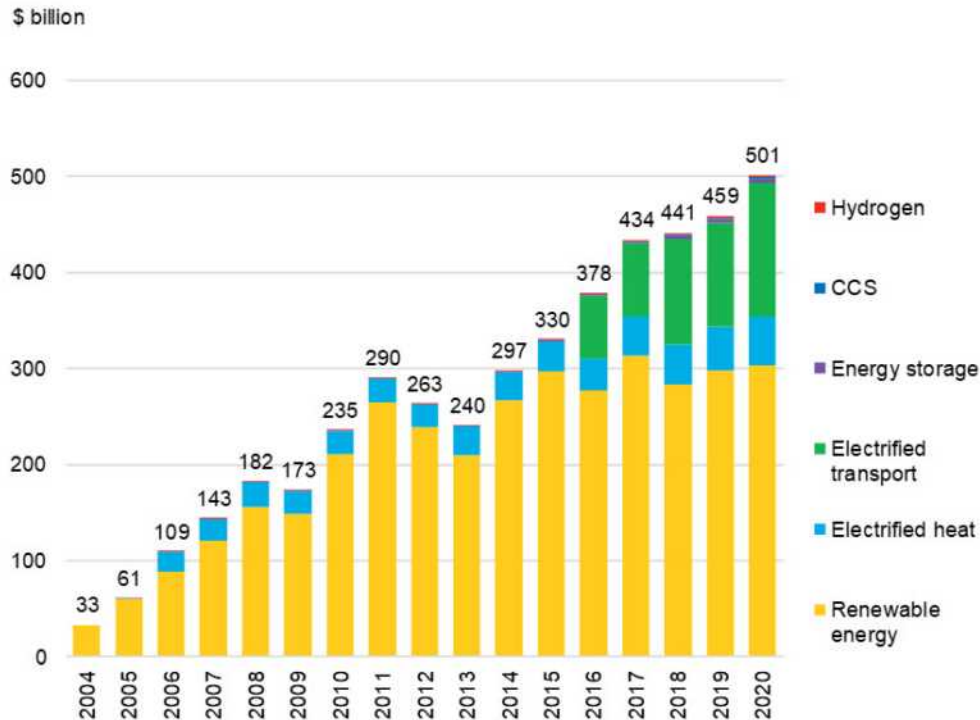
1.4 FUTURO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

El desarrollo de nuevas fuentes de energía requiere de una gran inversión para poder construir las infraestructuras necesarias. Estas inversiones suponen un aumento en el precio de la electricidad, sobre todo durante los primeros años de desarrollo. El proceso es complejo, en primer lugar, se debe establecer un plan y convencer a los inversores de su eficacia. Encontrar un lugar en el que llevar a cabo un parque de placas solares, por ejemplo, puede llevar años. Además, se debe contar de gente especializada y entrenada. Todo ello ha hecho que el gran inconveniente de las energías renovables sea la enorme inversión inicial que se requiere. No obstante, el avance de las nuevas tecnologías está cambiando las cosas.

La bajada de los precios debido al avance tecnológico es clave para una rápida evolución de las energías renovables, y los resultados ya se están empezando a observar. El precio de algunas fuentes de energías renovables es ya inferior al de otras fuentes de energía no renovables. Se puede decir que hoy en día es más barato salvar el medio ambiente que destruirlo, pero la presencia de los combustibles es todavía un obstáculo que hay que superar.

La explosión del COVID 19 en 2020 conllevó a una gran crisis económica mundial, la cual afectó a la reducción de los precios de la energía eólica y solar. La innovación en el sector de las energías renovables permitió alcanzar un nuevo récord de generación de energía eléctrica y fueron la única fuente que logró un crecimiento neto positivo. Esto provocó un aumento descontrolado de las inversiones en energías renovables.

Figure 1: Global energy transition investment, 2004-2020



Source: BloombergNEF. Note: electrified heat figures begin in 2006; electrified transport in 2016; hydrogen and CCS in 2018.

Figura 9. Inversión en renovables a lo largo de los años

La gráfica (Figura 9) proporcionada por BloombergNEF muestra claramente un progresivo aumento de las inversiones en energías renovables, incluso en 2020, cuando se vivía una enorme crisis económica debido a la pandemia por el COVID 19. Las cifras de BNEF muestran que las empresas, el gobierno y los hogares invirtieron 303,500 millones de euros en energías renovables, fomentando así un crecimiento del 2%. Este crecimiento se debe mayoritariamente al aumento de proyectos de energía solar y de eólica marina en el mundo. También cabe destacar una importante campaña dirigida a promover el uso de vehículos eléctricos.

La energía renovable ha sido hasta ahora la fuente de energía más resistente a las medidas de bloqueo tomadas por el COVID 19. La electricidad procedente de fuentes de energía renovables no se ha visto tan afectada como otras fuentes de energía no renovables. Durante el primer trimestre de 2020, el uso global de energía renovable en todos los sectores aumentó

aproximadamente un 1% en relación con el primer trimestre del año anterior. La generación de electricidad renovable aumentó así un 3%, principalmente debido a los nuevos proyectos eólicos y solares fotovoltaicos.

Según un estudio realizado por Agencia Internacional de la Energía (IEA), para 2026 la capacidad mundial de electricidad renovable aumentará en más de un 60%, hasta alcanzar la capacidad actual de energía mundial de los combustibles fósiles y la energía nuclear juntos. [13]

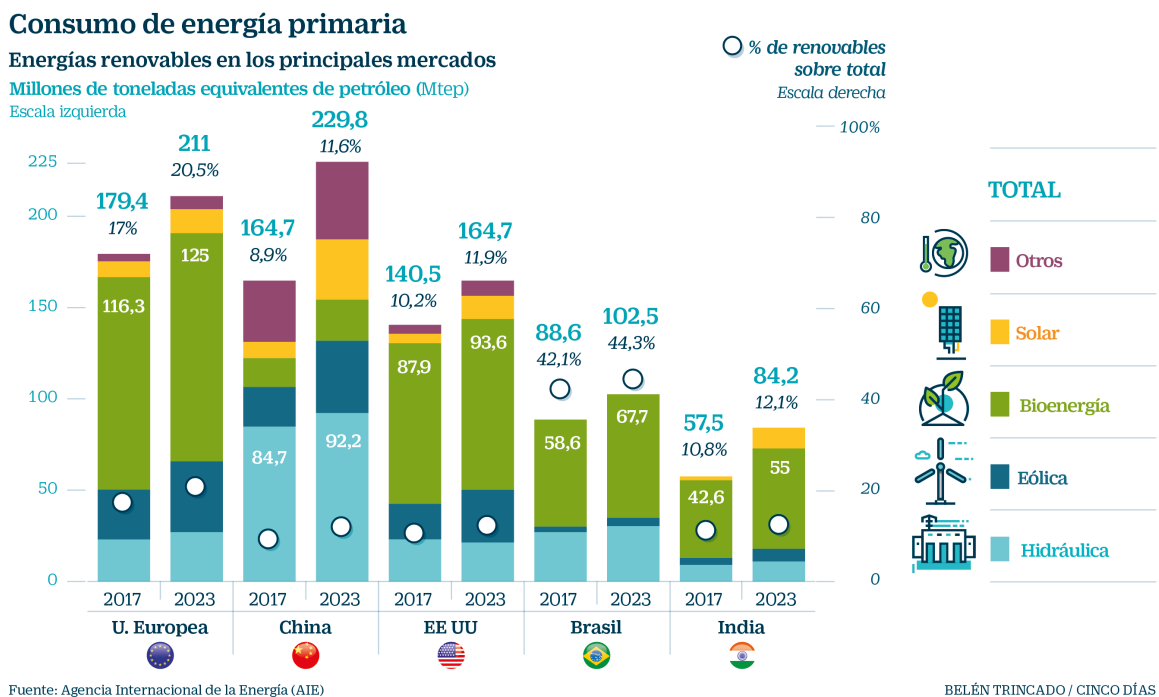


Figura 10. Consumo de energía mundial

En la gráfica anterior, cabe destacar como muestran los datos de IRENA, que China alcanzará casi el 100% de energías renovables en 2023 sobre el total de energía consumida en el país. China generó 2.49 billones de kW a partir de energía renovable en 2021, esta cantidad representa alrededor del 30% del consumo total de electricidad el país.

Las energías renovables son los mejores aliados para poder estabilizar los precios de la energía en el futuro ya que en este momento están proporcionando electricidad asequible en todo el mundo.

Una de las principales críticas que recibe este tipo de energía es la enorme inversión inicial que requiere la construcción de sus instalaciones. A pesar de ello, ya que su funcionamiento se puede lograr a un coste muy bajo, los precios de las energías renovables pueden ser muy constantes a lo largo de su ciclo de vida. Cabe destacar que los costes por el desarrollo y construcción de instalaciones renovables se ha visto reducido en gran medida, y lo seguirá haciendo en los próximos años. Por ejemplo, el precio medio de generación de energía eólica bajó más de un 65% entre los años 2009 y 2016. Además, el coste de instalación de la energía solar se vio reducida en más del 70% entre 2010 y 2017. Con el paso de los años, los mercados madurarán y aprovechando las economías de escala los costes se reducirán aún más. [14]

En contraste, los combustibles fósiles son impredecibles. Los precios de estos pueden variar de forma descontrolada y son más propensos a sufrir grandes oscilaciones de precios. Por ejemplo, antes de la crisis del 2008 se produjo un aumento del precio del carbón en EEUU provocado al aumento de su demanda. Sin embargo, después del 2008 se produjo una muy rápida caída de los precios. No obstante, en 2022 se ha producido uno de los aumentos más drásticos en el precio de los combustibles fósiles.

Precios derivados del petróleo - 2022-06-20			
Países	Super 95	Diesel	Diesel Cal.
España [+]	2,142 €	2,077 €	1,594 €
Alemania [+]	1,974 €	2,061 €	1,529 €
Reino Unido [+]	1,249 €	1,301 €	0,533 €
Francia [+]	2,129 €	2,135 €	1,726 €
Italia [+]	2,063 €	2,006 €	1,991 €
Portugal [+]	2,121 €	2,080 €	2,034 €
Estados Unidos [+]	1,265 €	1,445 €	

Figura 11. Precios del petróleo a 20/06/2022

Los precios del combustible han aumentado hasta alcanzar niveles de récord histórico. Según las últimas estimaciones realizadas, en España el precio del litro de gasolina se sitúa en 2.142€ [15]. Además, en las últimas semanas protagonizadas por la invasión rusa de Ucrania,

la escalada de precios se va a multiplicar aún más. A pesar de ello, Antonio Turiel, investigador del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) defiende que desde el año 2014 las empresas petroleras están reduciendo su inversión porque extraer petróleo es cada vez más caro.

El aumento del uso de las energías renovables como son la eólica o la solar pueden lograr reducir los precios y la demanda de gas y carbón. Además, un aumento de la dependencia de las energías renovables puede ayudar a proteger a los consumidores en el momento que se produzcan oscilaciones en los precios de los combustibles fósiles.

	Coste total instalado			Capacidad			Coste medio de electricidad		
	2010	2020	Variación	2010	2020	Variación	2010	2020	Variación
Bioenergía	2619	2543	-3%	72	70	-2%	0.076	0.076	0%
Geotérmica	2620	4468	71%	87	83	-5%	0.049	0.071	45%
Hidroeléctrica	1269	1870	47%	44	46	4%	0.038	0.044	18%
Solar	4731	883	-81%	14	16	17%	0.381	0.057	-85%
Eólica onshore	1971	1355	-31%	27	36	31%	0.089	0.039	-56%
Eólica offshore	4706	3185	-32%	38	40	6%	0.162	0.084	-48%

Tabla 1. Coste instalación por tecnología

La tabla anterior recoge los datos obtenidos en un estudio realizado por la Agencia Internacional de las Energías Renovables. En ella se puede observar cómo claramente la reducción de precios más notable fue la de las energías eólicas, tanto marinas como terrestres, así como la solar fotovoltaica. Cabe destacar el aumento de los costes de la energía hidráulica. Este tipo de fuente ya está desarrollada, y su desarrollo e innovación es mínimo por lo que no se aprecia una reducción en su coste. El aumento de este coste se podría deber a que la mayoría de los ríos están ya explotados para conseguir este tipo de energía. Además, cambios en los cauces del río pueden tener un impacto muy grande en la naturaleza y en los núcleos urbanos cercanos.

Mientras tanto, los obstáculos para el progreso en el sector de las energías renovables persisten. Entre ellos se encuentra el lento aumento de la cuota de las energías renovables en el consumo total de energía (TFEC), la inadecuada innovación en algunos sectores, la necesidad de desarrollo de infraestructuras, la falta de asequibilidad en algunos mercados, la

ausencia de políticas gubernamentales de apoyo a las renovables y el continuo apoyo a los combustibles fósiles.

A pesar del mayor interés por los objetivos de cero emisiones netas durante 2020, estos objetivos no cubren necesariamente todos los gases de efecto invernadero o sectores, ni conducen necesariamente a una mayor atención a las energías renovables o al éxito en el cumplimiento de los objetivos de energías renovables. Aunque estos objetivos están en vigor en casi todos los países, muchos de ellos no estaban en vías de alcanzar sus objetivos para 2020 en múltiples sectores, y muchos aún no habían establecido nuevos objetivos como sus objetivos para 2020 expiraron.

1.5 IMPACTO INVASIÓN RUSA EN LA ENERGÍA

Rusia juega un papel muy importante en el mercado global de energía. Es uno de los tres principales suministradores de combustible y gas en el mundo, junto con Arabia Saudí y Estados Unidos. Rusia depende en gran medida de los ingresos procedentes del petróleo y el gas natural, que en 2021 representaron el 45% del presupuesto federal ruso.

Rusia es el segundo productor mundial de gas natural, por detrás de Estados Unidos, y cuenta con las mayores reservas de gas del mundo. Rusia es el mayor exportador de gas del mundo. En 2021, el país produjo 762 bcm de gas natural y exportó aproximadamente 210 bcm por gasoducto.

En el año 2021, la Unión Europea importó de Rusia una cantidad de más de 380 millones de metros cúbicos de gas diariamente. En total, la cantidad importada por Rusia representó alrededor del 45% de las importaciones que se realizaron en la Unión Europea en 2021, y casi el 40% de su consumo total de gas. [16]

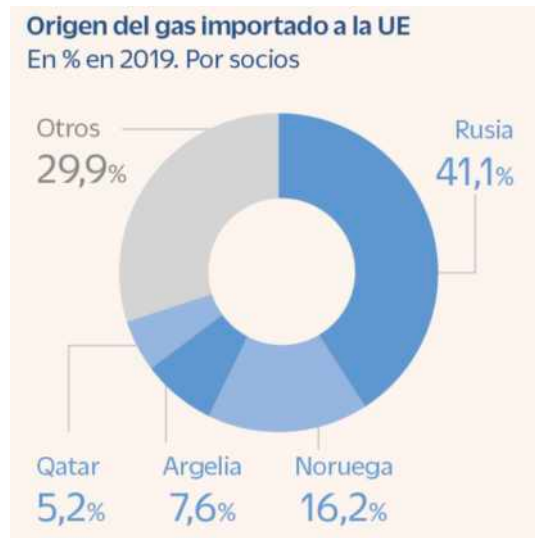


Figura 12. Origen gas importado



Figura 13 Socios importadores de gas

El progreso hacia el objetivo de cero emisiones en Europa reducirá el consumo de gas y las importaciones con el tiempo, pero la crisis actual tiene que ver con las importaciones de Rusia y lo que los responsables políticos y los consumidores pueden hacer al respecto. Uno de los principales objetivos de Europa es la necesidad de rellenar los almacenes europeos de gas en 2022, después de que los volúmenes almacenados se situarán en niveles alarmantemente bajos debido a la reducción del suministro por parte de Rusia.

Acelerar la inversión en tecnologías limpias y eficientes es una parte importante de la solución, pero incluso acelerar la implementación puede llevar tiempo para reducir significativamente la demanda de gas importado.

Además, países están optando por recurrir al carbón como alternativa del gas importado de Rusia. Esta solución se está llevando a cabo ignorando por completo el aumento de las emisiones de dióxido de carbono que conlleva. Sin embargo, recurrir al carbón dice mucho de la falta de recursos energéticos que presenta el mundo. Además, grandes países exportadores de carbón, como Australia, se están aprovechando de esta situación. Por ello, existe un amplio consenso entre los economistas de que la imposición de impuestos del carbono es una de las políticas más eficaces para reducir las emisiones de carbono. La invasión en Ucrania ha destapado la falta de recursos energéticos renovables y la urgente necesidad de fomentar este tipo de tecnologías.

Según una encuesta llevada a cabo por LevelTen, una empresa proveedora de infraestructuras para los recursos renovables, más del 30% de las empresas energéticas están duplicando sus inversiones en los países en los que están presentes. No obstante, se necesita mucha más inversión para poder salir de la crisis energética vigente.

Es importante destacar, que la invasión rusa de Ucrania ha recordado que la necesidad de una transacción energética no solo se debe llevar a cabo con el fin de afrontar y luchar contra el cambio climático, sino para también alcanzar una independencia y distribución del poder energético en el mundo.

Capítulo 2. ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE

Varios han sido los factores clave para impulsar las energías renovables, siendo la más importante la contribución del calentamiento global a las emisiones de dióxido de carbono procedente de la combustión de combustibles fósiles. La preocupación en la reducción de la contaminación ha fomentado en gran medida en el crecimiento de las energías renovables.

Como resultado, la energía eólica ha ido cogiendo protagonismo entre las energías renovables por ser una energía limpia, abundante y renovable, y esto ha hecho que esté creciendo sin parar. La energía eólica es clave para la consecución de los objetivos del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) y poder alcanzar en 2030 que el 42% del consumo de energía sea procedente de renovables. España cuenta con más de 1260 parques eólicos terrestres dando empleo a más de 27.000 profesionales y contribuyendo en un 0.3% al PIB según datos del Estudio Macroeconómico del Sector Eólico de AEE 2020. [17]

En la figura 3 se observa cómo ha ido evolucionando la potencia eólica en el mundo a lo largo de los años 2016-2020. Se puede apreciar un claro crecimiento. En el año 2016, el incremento de la potencia total instalada en el mundo fue de 54.9 GW, mientras que, en el año 2020, se produjo un salto abismal alcanzando los 93 GW.



Figura 14. Evolución potencia eólica en el mundo

Gráfica 11. Evolución potencia eólica en el mundo

En 2020, la energía eólica se ha convertido en la segunda fuente de generación eléctrica en España, convirtiéndose en el quinto país del mundo por potencia eólica instalada detrás de China, Estados Unidos, Alemania e India. España cuenta con importantes recursos eólicos y la producción de este tipo de energía ha ido creciendo rápidamente en los 15 años en la que se ha duplicado la producción. En la gráfica (figura 15) se puede observar que en 2021 se generaron 60.496 GWh en los 1.265 parques eólicos distribuidos en más de 1000 municipios españoles.

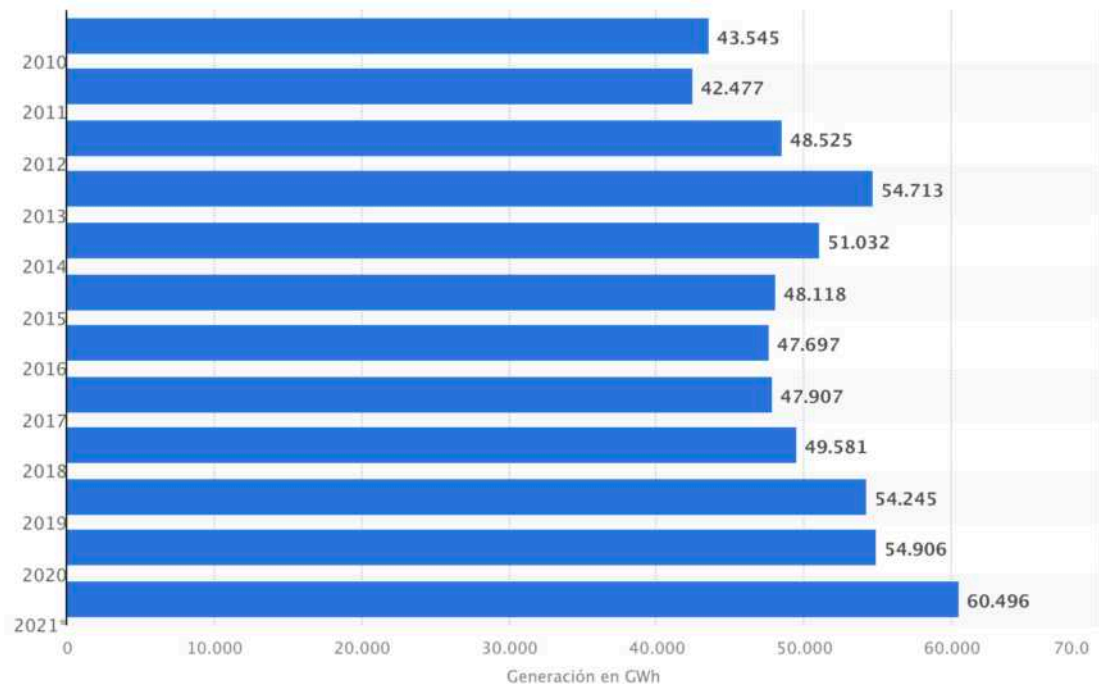


Figura 15. Generación eólica en España

A la hora de instalar un parque eólico es de gran importancia conocer la situación geográfica y las condiciones meteorológicas para poder identificar y analizar su índice de producción. Factores como la cercanía a la costa, a zonas montañosa o en extensiones de grandes dimensiones en el interior de la meseta son lugares idóneos para el desarrollo e instalación de un parque eólico.

A pesar de los enormes avances que se han llevado a cabo en la industria de la energía eólica, la mayoría de los parques eólicos están instalados en tierra. Sin embargo, existe una nueva forma de aprovechar el recurso eólico, la energía eólica marina.

2.1 EÓLICA MARINA EN EL MUNDO

El mar presenta numerosos recursos sin explotar. La eólica marina permite explotar mayores y en ocasiones más suaves vientos que la eólica instalada en tierra, a la vez que permite lograr proyectos de producción a gran escala de gigawatios cerca de zonas densamente pobladas. Esto hace que la energía eólica marina tenga un papel de gran importancia en el conjunto de tecnologías de baja emisión de carbono disponibles para descarbonizar el sector energético de muchos países.

La energía eólica marina es una de las tecnologías emergentes que ha alcanzado una gran madurez en los últimos años gracias a la rápida mejora de las tecnologías, la eficacia de la cadena de suministros y las sinergias logísticas entre países estrechamente vinculados en Europa. Todo ello ha permitido una rápida reducción de los costes y el inicio de una importante aceptación en nuevos mercados de la eólica marina.

El impulso político y los incentivos financieros por parte del gobierno y empresas, ha hecho que la eólica marina gane protagonismo ya que introduce una nueva alternativa complementaria para alcanzar algunos de los retos a los que se enfrenta el despliegue de la energía eólica terrestres, principalmente en lo que respecta a la congestión de la transmisión y las limitaciones del terreno.

La energía procedente de los parques eólicos marinos está creciendo. En 2020, este tipo de fuente de energía generó una cantidad de energía muy pequeña en comparación con el resto de las fuentes disponibles. La energía eólica marina representa actualmente únicamente el 0.3% de la producción mundial de electricidad, pero es evidente su enorme potencial [18]. Es importante el impulso y trabajo que deben llevar a cabo los gobiernos e industria para

que este tipo de fuente de energía se convierta en un pilar de las transiciones energéticas limpias.

La energía eólica marina tuvo su primera aparición en el año 1991 con la construcción del primer parque eólico en las costas de Dinamarca. Después de 30 años, la potencia instalada de energía eólica en el mundo es de 34.137 MW [19]. En la imagen 3 se puede observar cómo ha ido creciendo la producción de energía offshore en el mundo y la proyección que se espera según el estudio realizado por la Agencia internacional de las Energías renovables.

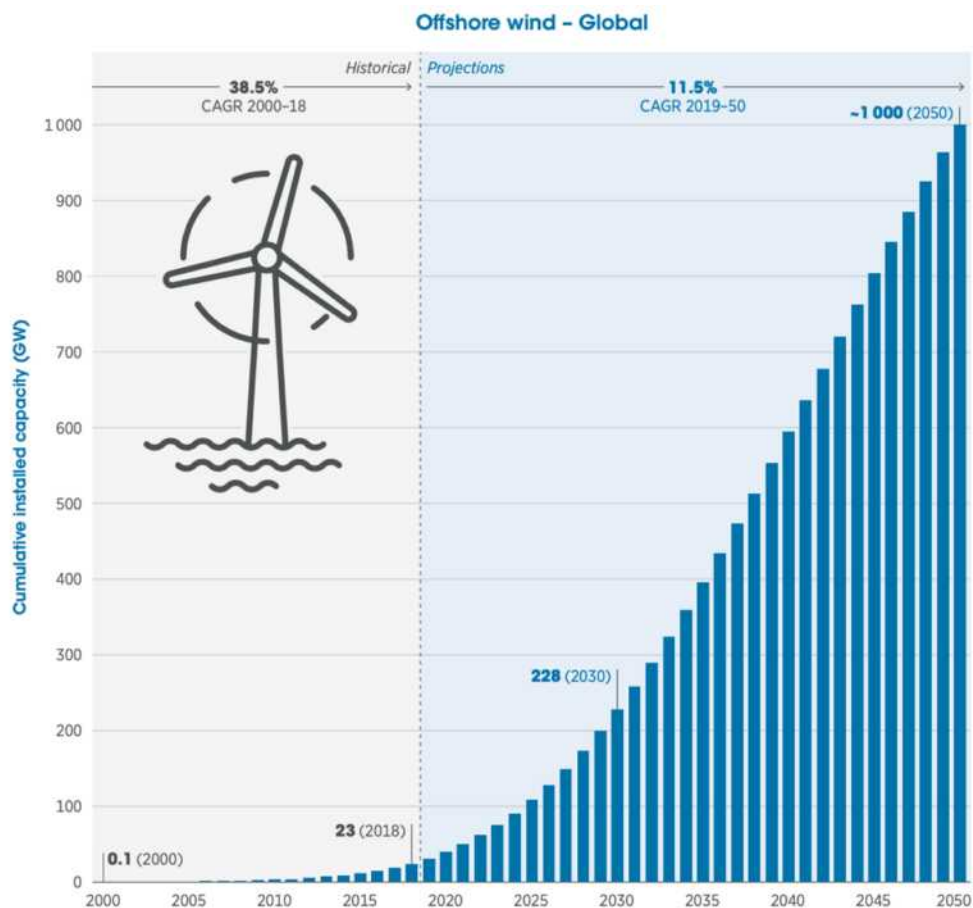


Figura 16. Capacidad instalada y proyecciones de futuro

El mercado de la energía eólica marina creció aproximadamente un 30%. China se ha convertido en el líder mundial en nuevas instalaciones por tercer año consecutivo, con más de 3 GW de instalación eólica marina [20]. La capacidad restante está ocupada por el fuerte crecimiento de esta tecnología en Europa, especialmente en Países Bajos que tiene casi 2 GW instalados. Según los datos de Global Wind Energy Council, se predice que, según la política llevada a cabo hoy en día, se instalarán 235 GW en la próxima década. Esta capacidad es siete veces el tamaño del mercado de la eólica marina actual.

El crecimiento de la energía eólica marina se está desarrollando principalmente en los países europeos costeros al Mar del Norte. En el Mar del Norte, los recursos eólicos de alta calidad y el fondo marino relativamente poco profundo crean condiciones excepcionales para el desarrollo y construcción de parques eólicos.

En Europa, el Reino Unido es el país líder en producción de energía eólica marina. La reducción de las emisiones de dióxido de carbono fue la razón principal por la que el Reino Unido decidió apostar por la eólica marina. El elemento más influyente ha sido la drástica bajada de los costes. Según el análisis llevado a cabo por Carbon Brief que se puede ver representado en la gráfica 14, los costes han bajado de 167 libras por cada MWh para los proyectos que entraron a funcionar en el año 2017 a 44 libras por MWh para los proyectos futuros del año 2023, lo que supone una reducción de costes del 75%.

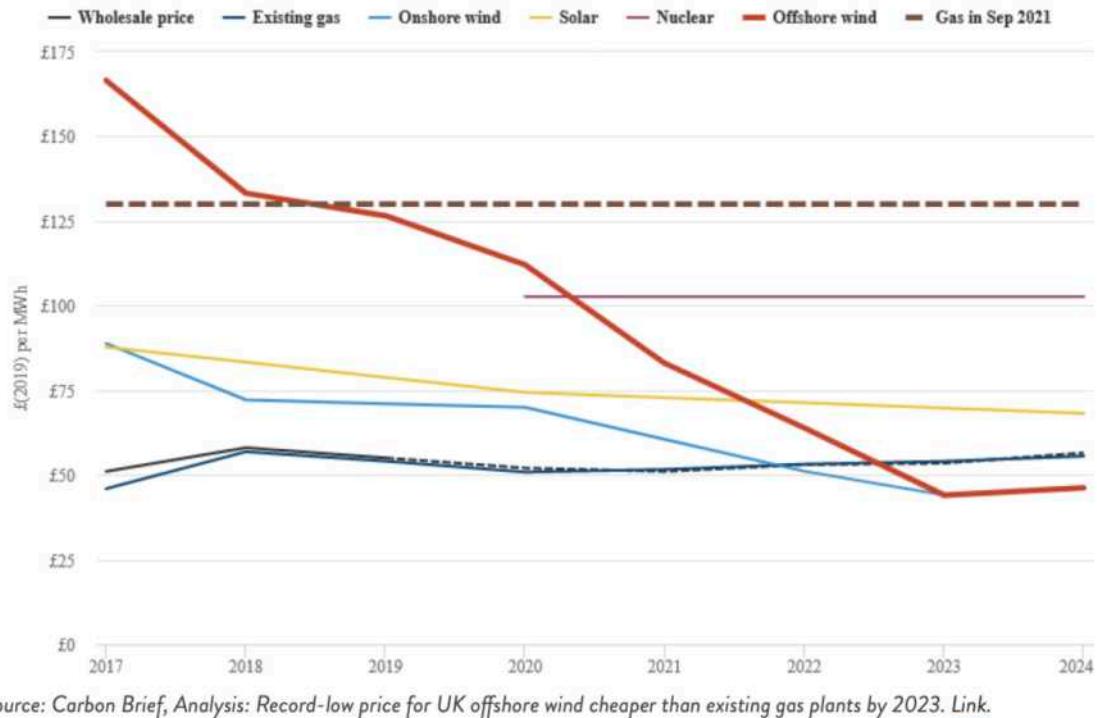


Figura 17. Coste por MWh de la eólica marina

Los costes son ahora tan bajos que resulta más barato construir y explotar nuevos parques marinos que seguir recurriendo a la explotación de las centrales de gas existentes. Los componentes que más contribuyen en los costes de instalación de un parque eólico marino son las turbinas, la cimentación, la conexión a la red eléctrica y la instalación. La turbina representa el 45% de los costes de instalación, pero la mejora de la tecnología y las inversiones que se están llevando a cabo en el sector de la energía eólica marina están contribuyendo a reducir aún más los costes.

A pesar de la fuerte presencia de la eólica marina en el Reino Unido, el gobierno británico pretende cuadruplicar la energía procedente de la eólica marina, con el fin de poder rebajar las facturas de los consumidores y de conseguir una mayor independencia energética con Rusia.

LOAD FACTORS (%)	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Onshore Wind	23,6	28,0	26,7	26,5	28,1	23,2
Offshore Wind	36,0	38,9	39,9	40,4	45,7	37,4
Solar photovoltaics	11,0	10,6	11,2	10,9	11,2	10,4
Hydro	33,9	36,3	33,2	35,6	41,0	30,5
Landfill gas	50,4	46,0	42,0	39,1	37,7	35,7
Sewage sludge digestion	44,3	43,9	46,0	48,6	49,3	47,4
Energy from waste	31,9	36,5	35,8	35,4	35,8	36,8
Animal Biomass (non-AD)	61,7	57,3	56,0	58,3	57,0	54,8
Anaerobic Digestion	62,2	62,5	61,7	62,4	61,9	70,2
Plant Biomass	78,5	77,7	70,6	64,1	67,2	67,7
TOTAL	28,3	29,7	29,8	30,0	32,4	28,6

Tabla 2. Capacidad y generación de las distintas fuentes renovables en el Reino Unido

La tabla anterior se ha realizado con los datos proporcionados por el portal del gobierno del Reino Unido. Se puede observar como la energía eólica marina supuso el 23,2% de las energías renovables y el gobierno actual propone llegar a 2030 y alcanzar el 30% [21]. Países como España deberían de tomar a Reino Unido como guía y referencia para fomentar las renovables.

2.2 EÓLICA MARINA EN ESPAÑA

España es uno de los líderes europeos en energía eólica pero aún no ha entrado en desarrollo la eólica marina. No obstante, el gobierno español ha cerrado una consulta para la primera hoja de ruta de la energía eólica marina en España, lo cual es un hito clave en el camino hacia los primeros parques eólicos en España. El Consejo de ministros aprobó en 2021 la Hoja de ruta para el Desarrollo de la eólica marina y de las energías del mar en España, fomentando así un desarrollo tecnológico de las distintas fuentes de energía limpia que aprovechan los recursos que ofrecen los océanos.

A diferencia a los que ocurre en las costas de los mares del norte de Europa donde es posible alejarse kilómetros de la costa sin que en lecho marino alcance grandes profundidades, las aguas que rodean la península ibérica ganan profundidad muy deprisa. Las aguas en el mar Cantábrico, Mediterráneo y en el Océano Atlántico son enseguida muy profundas. Este

factor ha sido el determinante de que el sector eólico no haya prosperado en el territorio peninsular.

Colocar aerogeneradores en las profundidades de las costas españolas supone la construcción de torres de una longitud inalcanzable económicamente, además de que cimentar las torres es más caro en los lechos peninsulares por los fondos marinos rocosos que presenta. Otra de las barreras para el avance de la energía eólica marina han sido el turismo y la pesca. El previsible impacto paisajístico de los parques eólicos próximos a las costas no ha recibido una buena bienvenida.

Los países europeos bañados por el mar del Norte no cuentan con estas barreras y por ello la eólica marina ha prosperado y evolucionado en los últimos años. Las costas europeas cuentan con 25.000 MW de potencia eólica marina. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables, es necesario alcanzar los 228 GW de potencia eólica marina a nivel mundial para poder cumplir con los objetivos establecidos en el acuerdo de París.

Según la Asociación Empresarial Eólica, España cuenta con 6.000 kilómetros de costa en los cuáles existe recurso eólico abundante y estable. Sin embargo, España no cuenta con ningún parque eólico en fase comercial, sólo prototipos en las Islas Canarias, País Vasco y Galicia. Además, no sólo cuenta con el recurso eólico, sino también con un marco político, capacidad industrial en el sector eólico y naval y un gran interés por parte de los inversores. Sin embargo, no se puede elegir de forma aleatoria la ubicación en el mar en el que construir un parque eólico, sino que se deben hacer numerosos estudios y análisis que confirme que la ubicación sea un lugar adecuado y próspero para la producción de energía eólica marina.

Uno de los principales puntos que se deben tener en cuenta es la profundidad de las aguas, es decir, la profundidad de la plataforma continental. Casi el 100% de los parques eólicos instalados en el mundo son de cimentación fija donde los aerogeneradores están anclados al subsuelo marino. Con la ayuda del portal *European Atlas of the Seas* se ha obtenido el mapa (Figura 18) donde se puede observar la profundidad de los fondos marinos en Europa.

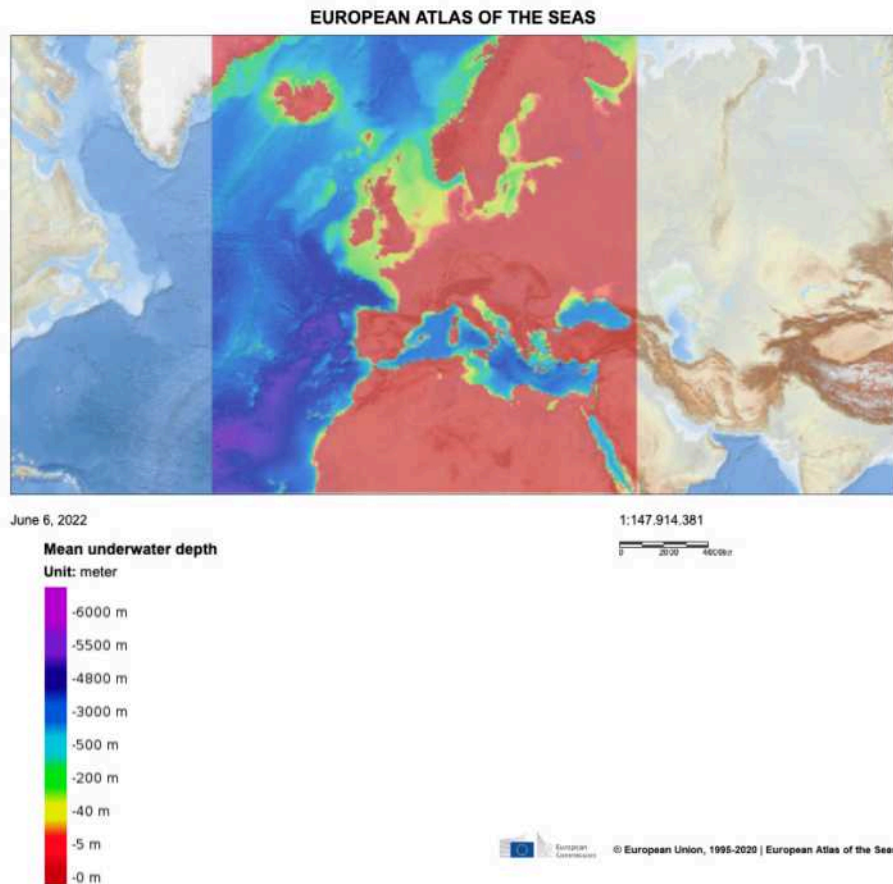


Figura 18. Mapa profundidad de los fondos marinos de Europa

Es evidente la correlación que hay entre la profundidad del fondo marino y la instalación de parques eólicos marinos. Podemos observar que en España a poco que nos alejamos de la costa la profundidad de la plataforma continental sufre un gran crecimiento. Lo contrario ocurre en el Mar del Norte donde se concentran la mayoría de los megavatios instalados en Europa.

Como consecuencia, la única solución para la prosperidad de parques eólicos marinos en las costas españolas son aerogeneradores flotantes. El inconveniente de este tipo de tecnología es su elevado coste ya que aún está en desarrollo y cuenta con poca experiencia de instalación en el mundo. Menos del 1% de los megavatios instalados en el mar en Europa son flotantes siendo este pequeño porcentaje parques de reducido tamaño y aún en pruebas.

El objetivo de la Hoja de Ruta mencionada anteriormente es alcanzar entre 1 y 3 GW de potencia eólica marina flotante y entre 40 y 60 MW de otras energías del mar en 2030. Esta Hoja busca convertir a España en referente internacional en capacidades industriales impulsando este tipo de energías que generen actividad económica, social y empleo. Para ello se deberá centrar la inversión en reforzar la industria española naval y marítima, y mejorando las capacidades logísticas con el fin de facilitar la fabricación y montaje de parques eólicos offshore. [22]

La Asociación Empresarial Eólica afirma que en el momento actual la energía eólica marina es una gran oportunidad para España ya que el sector ya ha desarrollado soluciones flotantes que posibilitan alejar la energía eólica de las costas. El avance que ha experimentado la eólica flotante abre la puerta a España en la industria permitiendo el emplazamiento de parques más alejados de la costa, con una capacidad de generación energética muy grande y con un impacto visual muy pequeño.

2.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA EÓLICA MARINA

En general, el crecimiento de la energía eólica mar adentro se debe a diversos factores determinantes, siendo el más importante la falta de espacio para el desarrollo de parques eólicos terrestres, el previsible menor impacto en el medio ambiente de los parques offshore, el apoyo gubernamental, etc. Además, la combinación de la disponibilidad de recurso y madurez de la energía eólica marina se acerca más a la de la energía eólica terrestre que el resto de las energías renovables.

La principal diferencia entre la instalación de energía eólica marina y terrestre está en la ubicación de las mismas, la cual es mucho más compleja en el caso de la eólica marina. Esto es, no sólo por el complejo diseño de construcción y explotación en el mar, sino a los diversos factores que pueden ser condicionantes.

La primera ventaja de la energía eólica marina es la mejor calidad del recurso eólico en el mar, donde la velocidad del viento suele ser mayor aumentando con la distancia a la costa, y más uniforme, lo que conlleva a menos efectos de turbulencia. Por ello, la fatiga queda en segundo plano, lo que permite aumentar la vida útil del generador eólico marino.

La segunda ventaja es la existencia de mayores zonas libres y adecuadas en el mar donde se puede llevar a cabo la instalación de parques eólicos. Su ubicación, lejos de zonas pobladas, permite reducir la emisión de ruido producida por la velocidad de las palas. Además, la gran distancia de la costa permite, en algunos casos, reducir el impacto visual. Por último, las turbinas en el mar pueden construirse más altas que las terrestres, lo que significa que pueden aprovechar más energía eléctrica.

Por el contrario, la primera desventaja es el coste del proceso de permisos e ingeniería, y de las fases de construcción y explotación de un parque eólico en alta mar. En los parques eólicos terrestres, el coste de los aerogeneradores de turbinas eólicas se sitúa en torno al 75% del coste total del proyecto, siendo este porcentaje en las instalaciones offshore de aproximadamente el 33%. Esto puede explicarse principalmente por los altos costes de las operaciones en el mar. No obstante, estos costes de construcción en alta mar pueden reducirse en el caso de estructuras flotantes ya que estas pueden ser llevadas a cabo en tierra, y después transportadas a la ubicación deseada.

Una segunda desventaja es que la eólica marina es aún una tecnología en desarrollo y evolución, que necesita de un gran impulso tecnológico y económico. Esto es esencial para los generadores de turbinas eólicas que están sometidos a grandes cargas y deben adaptarse al entorno marino y, por tanto, estar preparados para las condiciones de corrosión.

Otro de los aspectos para tener en cuenta a la hora de instalar un parque eólico marino son las políticas territoriales. Las zonas no aptas para la construcción de estas instalaciones suelen deberse al uso militar de las zonas marinas, petrolíferas de gas y petróleo, espacios protegidos o zonas de elevado tráfico marítimo. También se detectó que una estructura más elástica mejoraría aún más el efecto de amortiguación aerodinámico, pero como consecuencia un mayor movimiento de la torre.

Capítulo 3. TECNOLOGÍA DE UN PARQUE EÓLICO

OFFSHORE

Hoy en día, se ha alcanzado un nivel de desarrollo tecnológico muy elevado en cuanto a turbinas eólicas marinas, y se ha observado una disminución sustancial en el coste de la energía de los proyectos de eólica marina entre los años 2010 y 2020. Este descenso de los costes se debe a factores como el aumento en el diámetro del rotor, mayores inversiones y mejora de la tecnología de los aerogeneradores y de los procesos de instalación.

El objetivo principal de este proyecto es evaluar la posibilidad de instalar un parque eólico en las costas españolas del Mar Cantábrico, en función de las diversas condiciones medioambientales y legislativas. Como se ha mencionado anteriormente, la razón por la que España no avanza en este sector de la eólica marina es por el dominio de una tecnología basada en cimentación fija de los aerogeneradores, la cual es inviable en las costas españolas. Por ello, es importante analizar las posibles alternativas, como son las estructuras flotantes, además de un estudio del modelo de los aerogeneradores más adecuados a las condiciones de la ubicación escogida.

3.1 AEROGENERADOR

Durante la década de los 70, 80 y principios de los 90, varios estudios se llevaron a cabo en el campo de la eólica marina. La industria de la construcción naval y de energías renovables elaboraron informes de cómo aprovechar de forma eficaz el potencial de la energía eólica marina. Los primeros diseños se basaron en las turbinas construidas en la década de los 70 en el Mar del Norte y en las estructuras para la explotación de gas y petróleo en el mar. Las estructuras eran grandes, muy pesadas y rígidas. La imagen (figura 19) muestra el diseño llevado por RES, una de las mayores empresas de energía renovable.

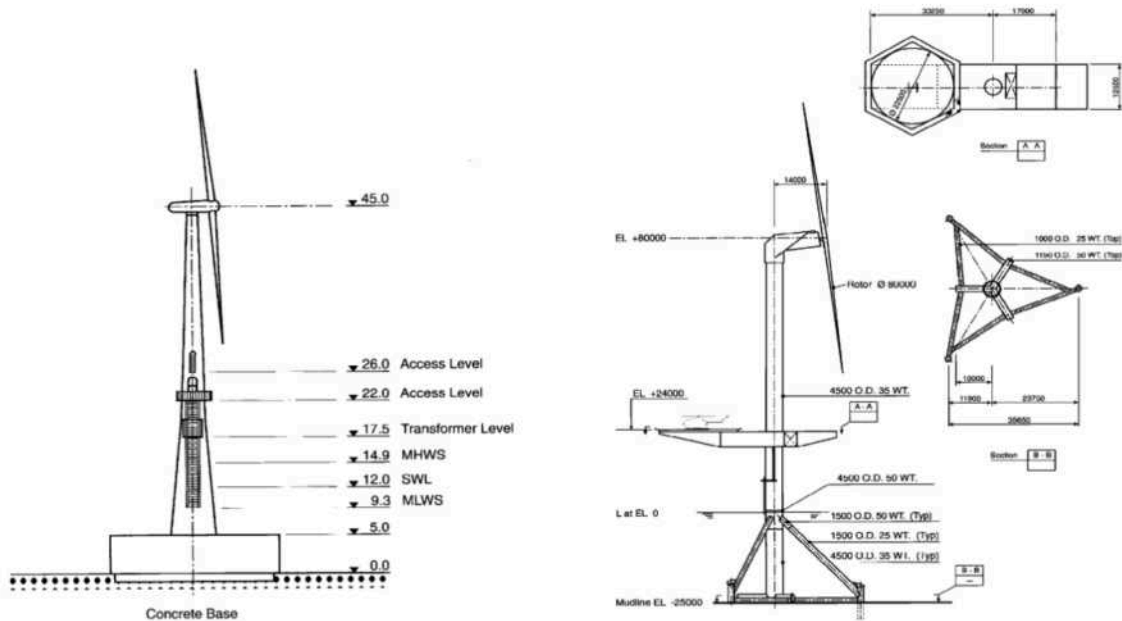


Figura 19. Diseño de un aerogenerador (RES)

El diseño propuesto incorporaba la carga combinada de las olas y de la fuerza del viento, pero sólo a nivel muy básico. No tenía en cuenta los casos con carga extrema. La gran rigidez de la estructura impidió una respuesta dinámica significativa, por lo que la fatiga no fue un problema.

Unos años más tarde se comprobó que en un tipo de turbina las cargas producidas por las olas podrán ser dominantes, mientras que en otros casos lo podía ser el viento. Uno de los principales asuntos a tratar fue el posible beneficio de la amortiguación aerodinámica en el comportamiento dinámico de la estructura cuando la turbina está en funcionamiento.

A día de hoy la tecnología de los aerogeneradores para la producción de energía eólica en alta mar ha evolucionado rápidamente. Existen varias empresas que han optado por invertir en la mejora de las turbinas. La turbina eólica marina diseñada por *GE Renewable Energy* alcanza una potencia de 14 MW. Varias empresas compiten por conseguir el aerogenerador más grande y potente. La empresa danesa Vestas, por ejemplo, pretende introducir en el

mercado una turbina de 15 MW para finales de 2022 [23]. No obstante, el tipo de estructura para la base del aerogenerador es esencial para poder lograr un mayor rendimiento y potencia.

La función básica de la estructura soporte es mantener la turbina eólica en su sitio. Esto significa que tiene que diseñarse teniendo en cuenta las cargas originadas por las corrientes marinas, las olas y el viento, que actúan tanto sobre la estructura como sobre la torre del aerogenerador.

En el mercado hay una gran variedad de aerogeneradores, diseñados por diferentes fabricantes de turbinas, con diferentes potencias. Cada turbina eólica tiene características diferentes. Las condiciones ambientales en alta mar también pueden variar de un sitio a otro. Por ello, las estructuras de soporte se diseñan específicamente para cada caso. No es raro que un emplazamiento en alta mar tenga varias variaciones de un tipo de estructura de soporte para un tipo de turbina.

Normalmente, la estructura de soporte se divide en dos partes principales: la torre de la turbina y la cimentación. La cimentación hace referencia a la estructura de soporte de la turbina, excluyendo la torre. La función que tiene la cimentación es dirigir las cargas de la estructura de soporte hacia el lecho marino.

Ya existen diversos tipos de cimientos para las turbinas eólicas marinas. La forma en la que se conectan estas al lecho marino depende principalmente de la profundidad del agua en la ubicación del parque. Se pueden distinguir dos tipos de estructuras: estructuras de cimentación fija y estructuras flotantes.

3.2 ESTRUCTURA FIJA

Como la tendencia actual del sector eólico marino es instalar aerogeneradores más grandes en aguas más profundas, las soluciones de cimentación para aguas poco profundas pueden resultar inviables desde el punto de vista económico y técnico.

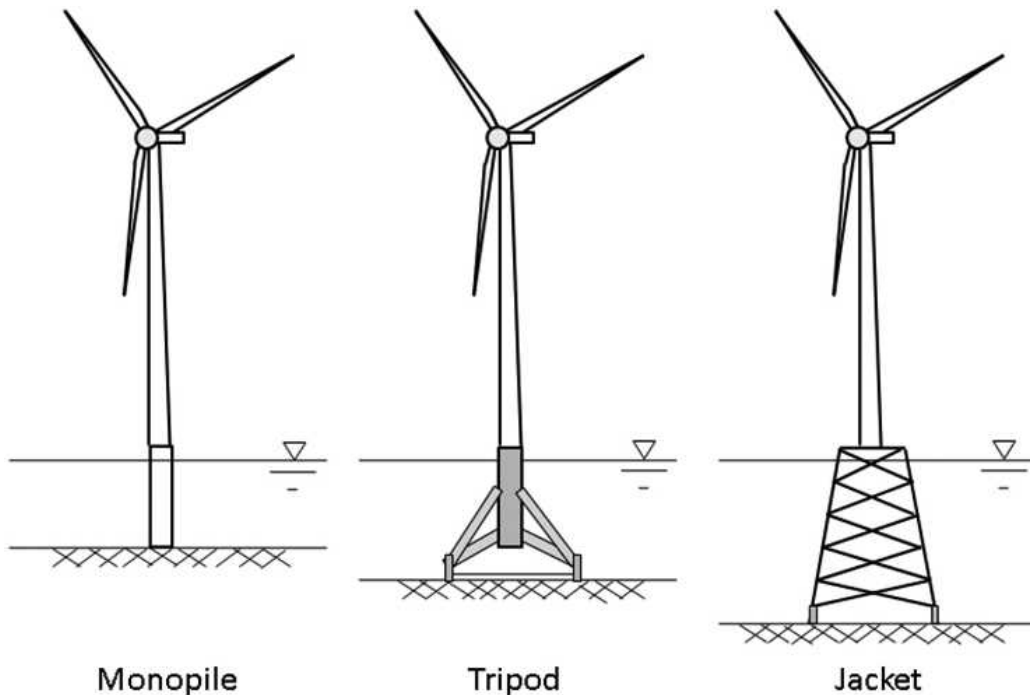


Figura 20. Consumo mundial de energía

MONOPILOTE

Se trata de una larga estructura tubular con un gran diámetro que se encuentra forjado al fondo marino. Debido a que los monopilotes presentan una estructura relativamente sencilla de construir e instalar, es la cimentación más usada para la eólica marina abarcando el 76% de todas las turbinas eólicas marinas instaladas. [24]

TRÍPODE

Aproximadamente el 5% de las cimentaciones marinas instaladas actualmente son trípodes. Se tratan de estructuras que constan de un pilar vertical central, conectado a tres patas que forman una amplia base en el lecho marino. La gran base proporciona una enorme estabilidad capaz de soportar grandes momentos de vuelco. [25]

JACKET

Este tipo de estructura representa el 6% de las cimentaciones instaladas. Son construcciones de tres o cuatro patas que se conectan mediante celosías. Debido a que están construidos por numerosos elementos tubulares conectados a nodos soldados, el coste de producción de este tipo de estructura es muy elevado. La estructura presenta una gran rigidez lo que la hace muy poco sensible al oleaje. [25]

3.3 ESTRUCTURA FLOTANTE

Se prevé que el sector de la energía eólica marina produzca 228 GW en 2030, suficiente para abastecer a más de 70 millones de hogares. No obstante, para poder alcanzar estos objetivos, las turbinas eólicas marinas están aumentando progresivamente su tamaño y se prevé su instalación en lugares remotos y a mayor profundidad. Aparecen así las estructuras flotantes.

El mayor reto técnico que presentan este tipo de estructuras es el movimiento relativo entre la torre y los cimientos de la estructura en alta mar. Sin embargo, las ventajas son muy diversas. Entre ellas está el bajo impacto medioambiental y la facilidad de construcción e instalación, ya que las turbinas y plataformas flotantes pueden construirse y montarse en tierra y ser luego transportadas hasta el lugar de instalación el alta mar. Además, se pueden aprovechar los fuertes vientos presentes en las zonas más profundas, consiguiendo así un mayor potencial energético. En la figura 21, se pueden apreciar los cuatro tipos de estructuras flotantes más desarrollados.



Figura 21. Estructuras flotantes más comunes (Iberdrola)

ESTRUCTURA SPAR

Se trata de un tipo de estructura de forma cilíndrica. Los materiales más utilizados son el acero y el hormigón. La idea de este tipo de diseño es distribuir la mayor parte de la carga en la parte más baja para dar mayor estabilidad. En resumen, la flotabilidad se consigue gracias al diseño cilíndrico mientras que la estabilidad se consigue con la adecuada distribución de la masa para que el centro de gravedad quede debajo del centro de boyantes. No obstante, como consecuencia del aumento del tamaño de las turbinas, se requiere diámetros cada vez mayores lo que hace que sea más difícil de construir, transportar e instalar, además de incrementarse el coste. [26]

ESTRUCTURA SEMI-SUB

Este tipo de modelo cuenta con tres pilares unidas entre sí por unos brazos, consiguiendo la estabilidad hidrostática necesaria para mantener la estructura estable en el agua. El objetivo es minimizar el área en contacto con el agua, pero maximizando el volumen de la estructura. Teniendo esto en cuenta, la mejor opción sería un diseño con una geometría esférica (más volumen con menor superficie), pero este no es adecuado para fabricar ni para soportar condiciones de fuerte oleaje.

ESTRUCTURA BARGE

Este tipo de estructura tiene una amplia superficie en contacto con el agua lo que hace que sea estable. Es una de las estructuras más utilizadas debido a su sencillez y bajo coste. Sin embargo, la mayor desventaja que presenta es la respuesta significativa de la plataforma a las olas.

ESTRUCTURA TLP

Se trata de la tecnología más reciente. La estructura no flota una vez se ha colocado la turbina sobre ella. Está formada por una columna central, tres columnas de esquina y pontones horizontales que conectan la columna central. La parte superior de las columnas está por encima del nivel del agua y se encuentra anclado al suelo por unos tendones. Antes de la instalación, se colocan flotadores para evitar para que el conjunto vuelque al subir el centro de gravedad.

3.4 POSIBLES MEJORAS EN EL AEROGENERADOR

Las principales mejoras que se pueden incluir en los modelos actuales de generadores marinos son mejorar el diseño actual reduciendo los componentes que lo forman, reducir la masa del generador y aumentar la eficiencia.

Por un lado, resulta atractivo analizar el *doubly-fed induction generator* (DFIG). Se trata de un tipo de generador muy utilizado en eólica marina que permite operar en varios rangos de velocidad. Sin embargo, este tipo de tecnologías son muy pesadas y requieren de un gran espacio de aire que logre provocar un par suficiente. Para poder conseguir un mejor rendimiento y esperar deformaciones iguales en el rotor y estator, se podría optar a una estructura elástica

En la industria de la eólica marina, también es habitual encontrar un sistema de refrigeración convencional con núcleo de hierro. En este tipo de máquinas, la mayor parte de la masa se destina a la construcción que representa el 80%. Un posible enfoque para minimizar las dimensiones de la máquina es utilizar un método de refrigeración más eficiente, como usar un método de refrigeración por agua (aprovechar agua del mar).

Por último, el uso de materiales conductores en las máquinas eléctricas puede reducir las pérdidas de excitación y aumentar la densidad de flujo magnético. Todo ello puede conseguir una mayor eficacia.

Capítulo 4. ESTUDIO LOCALIZACIÓN DEL PARQUE

España se ha convertido a lo largo de las últimas décadas en uno de los grandes líderes mundiales de la energía eólica terrestre. Es más, durante el año 2021, la energía eólica terrestre se ha convertido en la principal fuente de generación eléctrica en España, superando a la energía nuclear. Sin embargo, poco ha hecho España por fomentar otra forma de energía eólica: la energía eólica marina.

En los últimos años, al ver el avance de otros países europeos en el desarrollo de eólica marina, España ha empezado a llevar a cabo varios proyectos de este tipo de fuente de energía, a lo largo de las costas españolas. España está situada geográficamente en una localización idónea para la instalación de parques eólicos offshore.



Figura 22. División de aguas españolas

Un millón de kilómetros de las aguas marinas disponibles se encuentran bajo soberanía española. La figura 22 proporcionada por la Ordenación del Espacio Marítimo, nos muestra cómo se dividen las aguas bajo el territorio español. Se distinguen 5 demarcaciones: Noratlántico, Levantino - Balear, Estrecho y Alborán, Sudatlántica y Canaria. En concreto, la zona de las islas Canarias ha sido calificada según un estudio realizado por la empresa energética Iberdrola como uno de los lugares más adecuados para la construcción de un parque eólico marino.

En primer lugar, para poder llevar a cabo la instalación de estos parques eólicos hay que tener en cuenta consideraciones medioambientales, consideraciones técnicas como las profundidades marinas y consideraciones económicas. Es importante basar el estudio en factores recogidos en el Plan de Energías Renovables (PER). Este tiene en consideración aspectos tanto medio ambientales, como técnicos y económicos para la construcción del parque. La tabla (tabla 3) indica que únicamente el 0.61% de la superficie costera que dispone España es adecuada para la explotación de un parque eólico marino. Este estudio filtra según aspectos medioambientales y humanitarios como que la zona de estudio no solape con otras zonas de uso prioritario (defensa, acceso portuario...), con zonas de alta densidad de tráfico marítimo, que no interfiera con zonas de servidumbre aeronáuticas o que no solapen con otras zonas de alto potencial para la acuicultura. Además, el estudio pasa un filtrado de batimetría en el que la zona de localización del parque no puede superar los 50 m de profundidad, el cual solo el 2.7% de la superficie costera pasa.

	Zonificación EEAL parques marinos		+ Filtrado batimetría (cotas por encima de -50 m)		+ Filtrado recurso eólico ($v \geq 7,5$ m/s, a 80 m de altura)	
	Superficie litoral (km ²)	S (%)	Superficie restante (km ²)	S (%)	Superficie restante (km ²)	S (%)
Zonas "aptas"	84.666	36,8	512	2,7	31	0,9
Zonas "aptas con condicionantes"	89.759	39,0	6.110	32,5	1.381	39,1
Zonas "de exclusión"	55.889	24,3	12.159	64,7	2.116	60,0
Total litoral español	230.313					
Superficie "apta" para filtrados	174.425		6.623		1.412	
% "apta" resp. superficie total	75,73		2,88		0,61	

Tabla 3. Zonas aptas según el Plan de Energías Renovables

Las costas peninsulares, a diferencia de la costa de las islas canarias, se caracterizan por tener una gran profundidad, la cual inhabilita la construcción de una cimentación fija de los aerogeneradores. Sin embargo, gracias al avance de nuevas tecnologías y de la enorme inversión que se está llevando a cabo en el sector de las energías renovables, está abriendo camino a una nueva forma de parque eólico marino basado de estructuras flotantes. Esta nueva tecnología, hace que la zona de las costas de mar Cantábrico se conviertan en lugares con un enorme potencial para convertirse en un referente europeo en esta tecnología.

Al llevar a cabo la instalación de los parques marinos en dichas zonas, se buscará que ocupen el menor espacio marino posible, sin menoscabo de los objetivos de producción que se hayan fijado y de las distancias entre generadores. Además, a pesar de haberse buscado aquellas zonas que no interfieren con servidumbres aéreas, aun así, los parques eólicos marinos comerciales que se desplieguen deberán atenerse a las condiciones requeridas por la administración aérea.

A parte del impacto medioambiental, también se produce un impacto socioeconómico, que puede causar consecuencias en el ámbito no solo local sino nacional.

Sin embargo, la identificación de lugares adecuados es un problema geoespacial complejo. Resolver el problema requiere un amplio conocimiento de las condiciones del océano y la comprensión de varios aspectos técnicos y sociales. Una selección errónea del emplazamiento podría dar lugar a una baja extracción de energía, al descontento de los vecinos, a bajos ingresos económicos, a una influencia negativa en otras actividades marinas y a una discrepancia social.

El Mar del Océano Atlántico situado en el norte de la Península Ibérica, está limitado por el Cabo Ortigal en Galicia y la península de Bretaña en Francia. Se caracteriza por tener una profundidad máxima de 5000 metros [27]. Normalmente presenta un fuerte oleaje con un fuerte poder erosivo en las costas del litoral donde también son frecuentes los fuertes vientos del noroeste.

Su plataforma continental presenta una acentuada asimetría. Por un lado, en la costa española la plataforma es muy estrecha y escarpada, mientras que en las costas de Francia es necesario adentrarse varios kilómetros para encontrar profundidades superiores a los 1.000 metros.

A continuación, se va a llevar a cabo un estudio riguroso sobre la viabilidad de instalar un parque eólico siguiendo algunos de los factores que deben cumplir estos parques en España.

4.1 MARCO LEGAL

La energía eólica marina conforma un nuevo mercado emergente que la propia Unión Europea ha identificado como un mar de nuevas oportunidades. Los enormes efectos que tienen los combustibles fósiles en el medio ambiente y la subida de los precios de fuentes de energía de las que tanto se depende, no solo ha hecho que las energías renovables coloquiales se acentúen, sino que empiecen a surgir nuevas formas de obtener energía. Este ha sido el caso de la energía eólica marina.

Sin embargo, al tratarse de una tecnología novedosa y desconocida, este sector emergente se enfrenta a numerosos obstáculos de carácter técnico, político y económico que hacen que su desarrollo se dificulte. Además, la legislación actual puede resultar ambigua ya que está en pleno desarrollo, y puede haber aspectos que las autoridades e instituciones aún no hayan abarcado.

Una legislación que es necesario tener en cuenta a la hora de elegir la localización del parque es aquella que indica los espacios protegidos, dedicados a la conservación de la flora y fauna. En la figura 23 se muestra los distintos parques naturales protegidos que hay en España. Se puede apreciar como en la zona del Cantábrico solo aparece una zona como área marina protegida a varios kilómetros de las costas asturianas. Sin embargo, en cuanto a zonas protegidas las costas del norte del país no presentan grandes inconvenientes. No obstante, se puede observar como gran parte del litoral mediterráneo está protegido debido a que es considerado uno de los mares más amenazados y con mayor presión por parte del ser humano, además que se encuentra casi cerrado al completo por lo que el agua se renueva con dificultad.

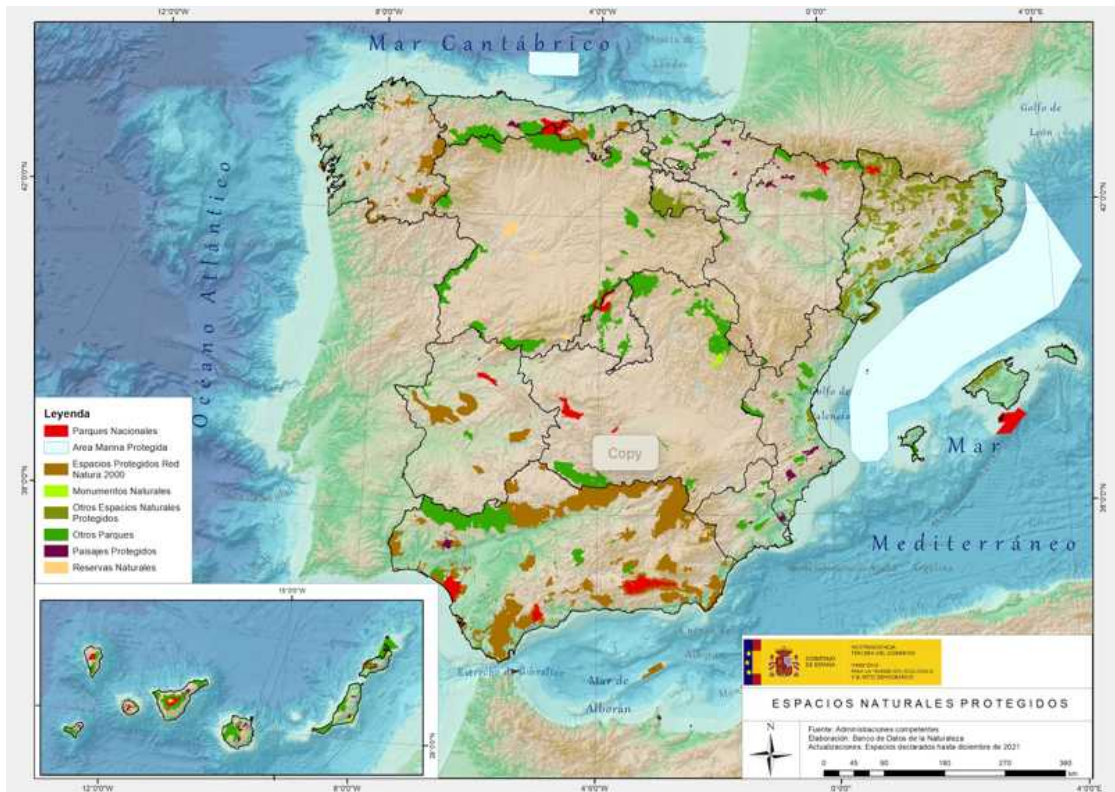


Figura 23. Zonas protegidas en España

	Terrestre	Marino
Porcentaje protegido a nivel nacional	14,74 %	4,92 %

No obstante, no sólo hay que tener en cuenta las zonas marinas protegidas, sino también aquellas zonas o parques naturales protegidos terrestres, ya que además de la construcción del parque en alta mar también se necesita una subestación eléctrica en tierra. Los espacios mostrados en la figura anterior tienen un alto nivel cultural y natural, y cuyo valor biológico es muy elevado. Por ello, deben mantenerse protegidos con el fin de conservar la flora y fauna.

A continuación, se ha analizado la densidad de flujo marítimo en las costas del mar Cantábrico. En la figura 24, se puede apreciar gracias al portal MarineTraffic, la densidad marítima en tiempo real a lo largo de las costas cantábricas. La zona de Galicia presenta una mayor densidad de barcos.

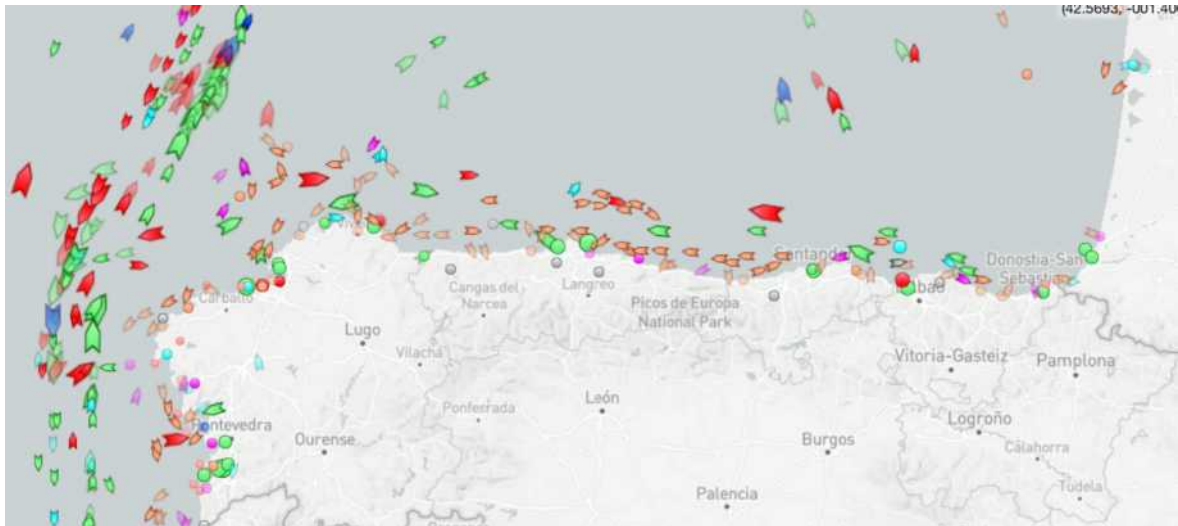


Figura 24. Densidad tráfico marítimo en el norte peninsular

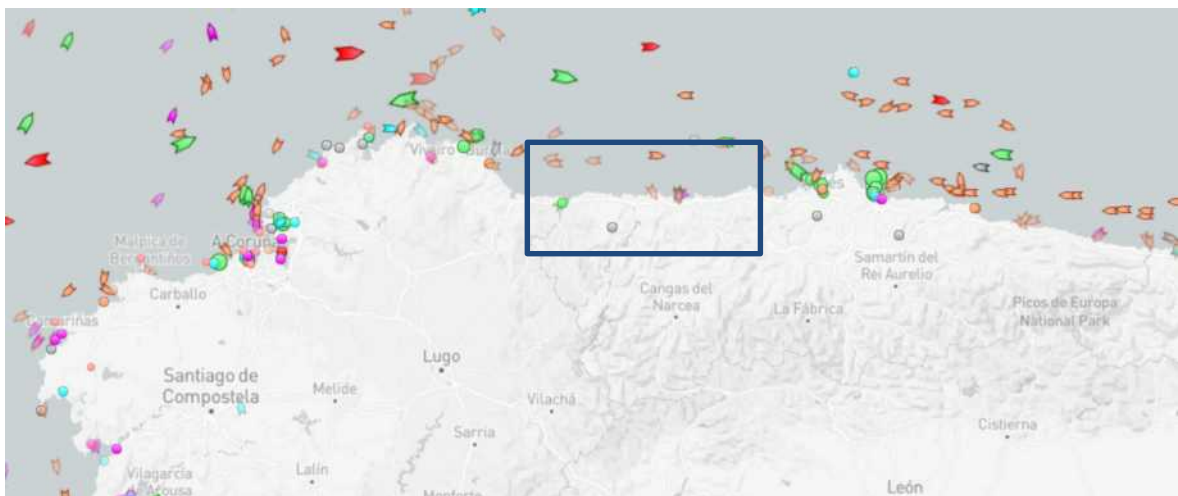


Figura 25. Densidad tráfico marítimo zona Galicia y Asturias

En la figura 25, se puede apreciar como la zona marcada de color azul presenta una menor densidad de tráfico marítimo, por lo que sería una zona más próspera para la localización del parque. En cualquier caso, aunque pueda parecer una zona óptima, aún tiene que pasar

muchos más filtros para poder concluir que se trata de una zona adecuada para la explotación de un parque eólico marino.

La Convención de las Naciones Unidas sobre los derechos de Mar establece el cumplimiento de las leyes que protegen y preservan el medio ambiente marino y la conservación de los recursos vivos que presentan. Esto conlleva a la prohibición a los Estados de explotar los espacios que puedan causar daños, y a la necesidad de estudiar los posibles efectos potenciales [29].

Gran parte de las leyes que afectan al sector de la eólica marina no son leyes exclusivas para este tipo de forma de energía particular. Unos pocos años atrás, solo se contaba con el Real Decreto 1028/2007, del 20 de julio, por el cual se establece un proceso de diseño para la tramitación de las solicitudes que autorizan la instalación de parques para la generación eléctrica en el mar territorial. Sin embargo, en diciembre del 2021 se publicó la Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar en España.

La Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina busca la implementación ordenada, progresiva, coordinada y compatible de los distintos usos del espacio marítimo, y priorizar la protección del patrimonio cultural de la costa. La Hoja de Ruta está alineada con el marco estratégico de energía y cambio climático propuesto por la Unión Europea.

En el documento, se establecen las zonas marinas específicas identificadas por los Planes de Ordenación del Espacio Marino, como ubicaciones de desarrollo preferente para la instalación de parques eólicos marinos. Además, cabe destacar la medida 3.4 sobre la adecuación del marco administrativo de autorización de instalaciones renovables marinas para que sea coherente con la normativa en vigor.

No sólo es necesario adecuar con las instituciones el marco para la autorización de proyectos de instalaciones de energías renovables marinas, sino que también se debe adecuar a las premisas por parte de otros sectores de la industria como son el turismo o la pesca. Las costas del mar cantábrico brillan por su naturaleza y paisajes que atraen al turismo. Además, el

sector de la pesca es uno de los mercados más importantes de esta zona del país. Por ello, son factores clave a la hora de construir el parque.

4.2 BATIMETRÍA

Ocupando aproximadamente cinco sextas partes de una gran península, España tiene una larga costa de unos 7905 km. Esto incluye costas atlánticas y mediterráneas 1075 km en el Golfo de Vizcaya, 1761 km frente al Océano Atlántico y 2058 km a lo largo del Mediterráneo, más 1.428 km en las Islas Baleares y 1.583 km en Canarias. Además, algunas de las regiones más fértiles y con las mayores concentraciones de población están en las regiones costeras, por lo que España puede definirse como un país marítimo.

Para el estudio de la batimetría de las costas cantábricas se ha recurrido a EmodNeta. La figura 26 muestra la profundidad de las aguas a lo largo del litoral del norte del país. Se puede observar cómo en gran parte se alcanzan grandes profundidades muy cerca de la costa. La línea de costa es muy irregular, donde el 90% corresponde a acantilados y sustratos rocosos, mientras que las zonas de playa sólo ocupan el 10% de la longitud total del litoral. El fondo marino es la continuación de estos lechos rocosos. La figura 27, muestra la zona más concreta mencionada anteriormente en el análisis del flujo marítimo. Se puede apreciar que la situación batimétrica es igual que en el resto del litoral. La profundidad supera los 50m en la mayoría de los casos.

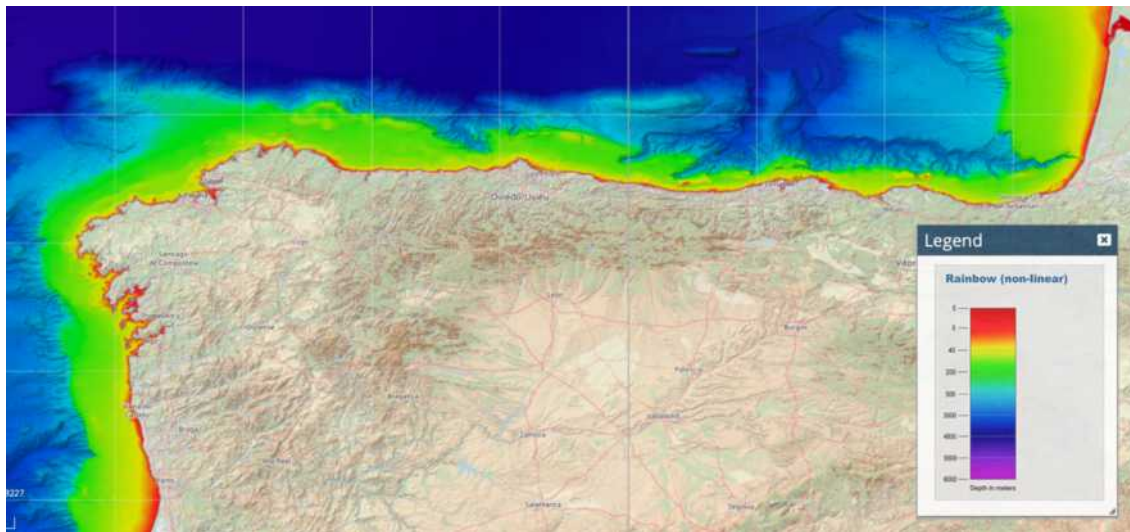


Figura 26. Mapa batimétrico norte peninsular

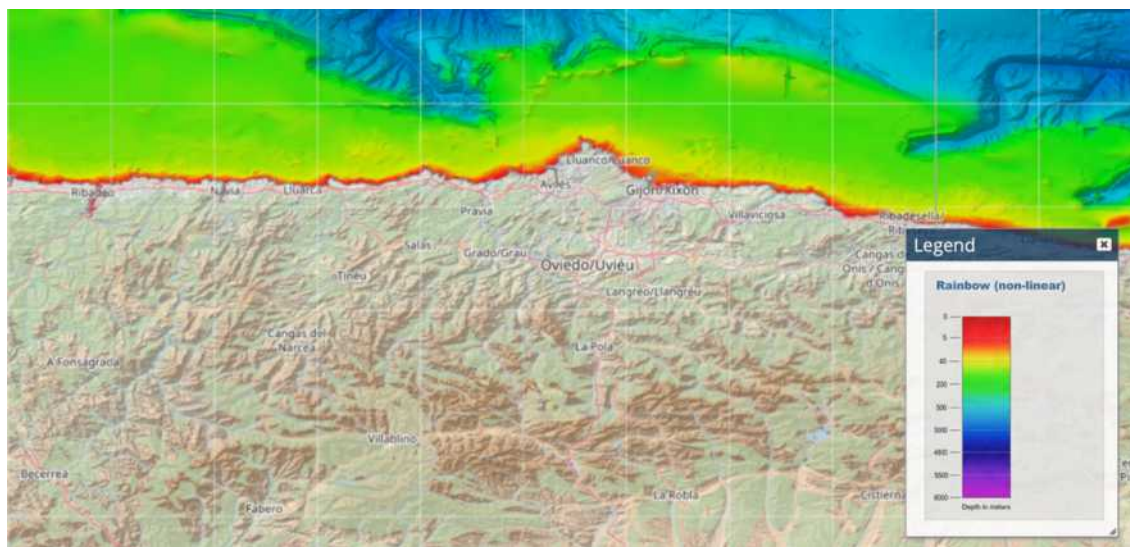


Figura 27. Mapa batimétrico costas asturianas

Una de las principales razones del fracaso en el avance de la energía eólica marina es la estrechez y escarpéz de los fondos marinos. Uno de los grandes retos que debe superar la energía eólica es la fijación al fondo marino de los aerogeneradores, y la zona a estudiar presenta enormes complicaciones. Por un lado, la gran profundidad hace imposible la construcción en alta mar de los generadores, además de que el fondo marino rocoso complica el proceso. Además, la cimentación fija requiere que la construcción del parque se lleve a

cabo en alta mar, lo que resulta muy complicado en la zona norte donde la presencia de vientos y tormentas es persistente.

Por todo ello, la construcción de un parque eólico con cimentación fija es prácticamente imposible en la zona que se va a estudiar. Pero gracias al avance de las tecnologías, cabe otra posibilidad: la construcción de un parque eólico flotante. A pesar de la posibilidad de instalar un parque eólico marino flotante, es conveniente, por motivos de viabilidad técnica, elegir zonas menos profundas para que el coste no se incremente.

La Red Europea de Observación y Datos Marinos es un portal a través del cual se pueden obtener datos con el objetivo de estimular la inversión sostenible en actividades costeras y de alta mar. Con la ayuda de este portal, se ha obtenido en la figura 28 el perfil de profundidad desde la costa de Luarca en Asturias, hasta una distancia de 32km donde podría instalarse el parque.

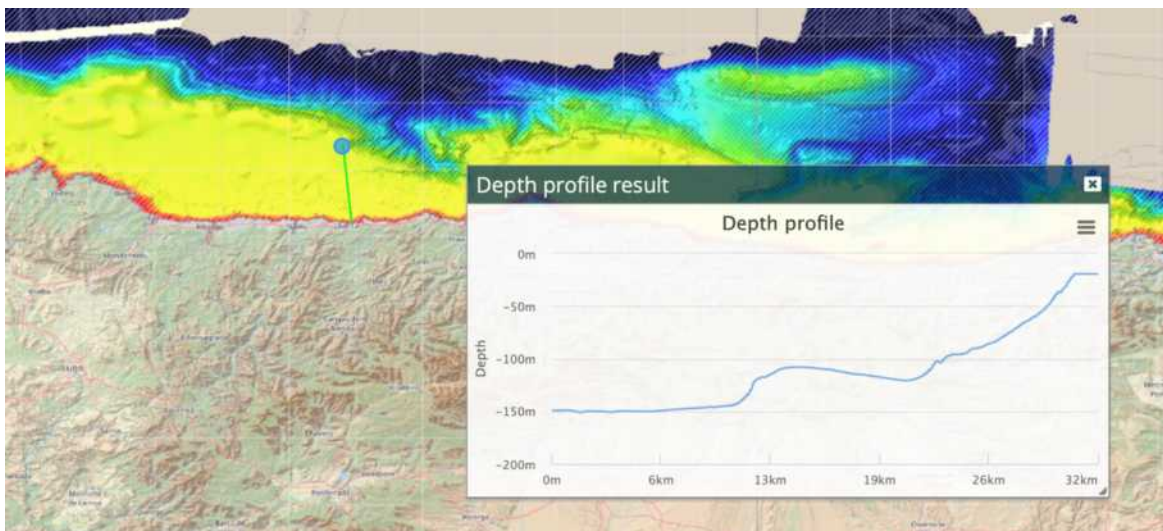


Figura 28. Perfil de profundidad

Si se hace un mismo análisis desde las costas de Ribadeo, se obtiene el perfil de profundidad que muestra la figura 29. Se puede observar que la profundidad se mantiene más o menos en torno a los 150m a una distancia de 32km de la costa. Es conveniente, que a la hora de

instalar un parque eólico marino flotante la profundidad no supere los 150-170 metros. Cabe mencionar que son muy pocos los proyectos de eólica marina que se han llevado a cabo, por lo que no hay una clara referencia.

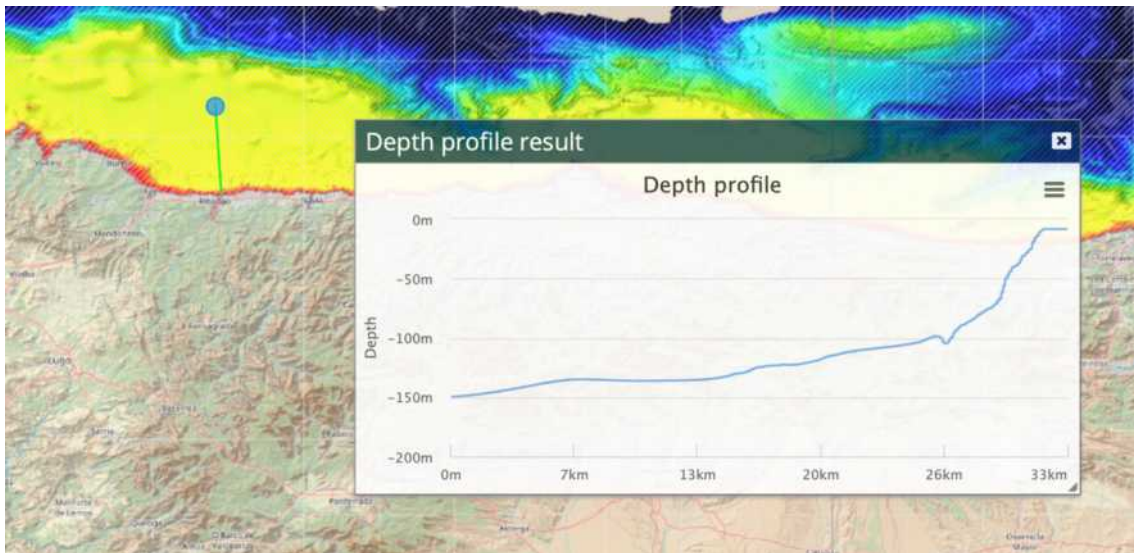


Figura 29. Perfil de profundidad

Se puede concluir, desde el punto de vista de la batimetría, que la zona costera oeste de Asturias presenta una profundidad abordable para la construcción del parque mediante la instalación de aerogeneradores flotantes. Es más, se espera que para 2030 se instalen parques eólicos marinos en las aguas asturianas alcanzando los 770 MW de potencia con la ayuda de la empresa española Windar.

4.3 OLEAJE

El conocimiento de los parámetros del oleaje es importante a la hora de elegir la estructura más adecuada para la instalación de los aerogeneradores y afinar su diseño. Las estimaciones de la potencia media de las olas a corto y largo plazo suelen considerarse el valor característico utilizado para el diseño. Conocer la variabilidad del recurso del oleaje en un lugar determinado, tanto estacional como anualmente, permite a los promotores de proyectos

evaluar la producción de energía a lo largo de la vida de un proyecto, con fines climatológicos.

El estudio del oleaje en la zona es imprescindible para garantizar la estabilidad de las estructuras flotantes que soportan a los aerogeneradores. Analizando la figura 30 proporcionada por Puertos del Estado, se puede apreciar la previsión del oleaje de un día cualquiera de primavera en la zona cantábrica. Las olas tienen una altura media de 1-2 metros.

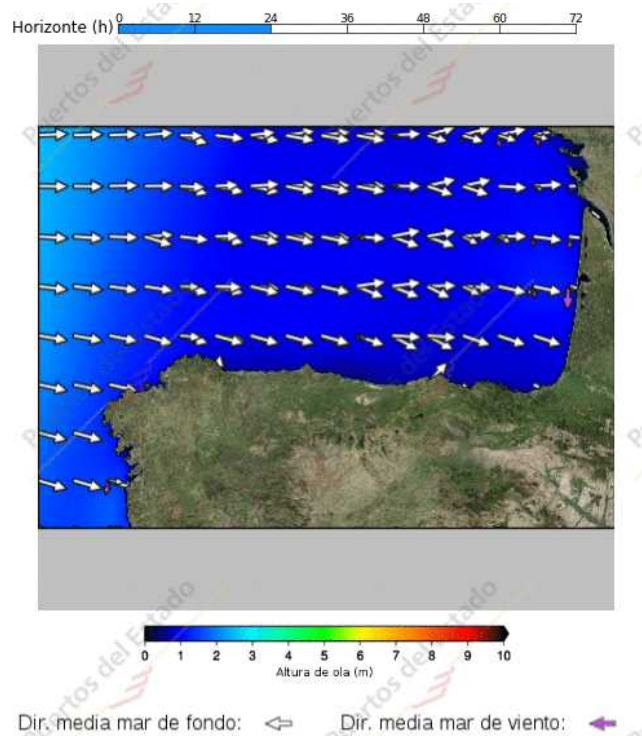


Figura 30. Dirección del viento en el norte peninsular

El parque eólico flotante situado en Eberdeen, Escocia, es el más grande construido hasta ahora. La figura 31, proporcionada por *Magicseaweed*, muestra la previsión del oleaje en una semana del mes de abril en la costa. Se puede apreciar como la altura de las olas es muy parecida a la vista en las costas de Asturias, una altura alrededor de 1 metro.

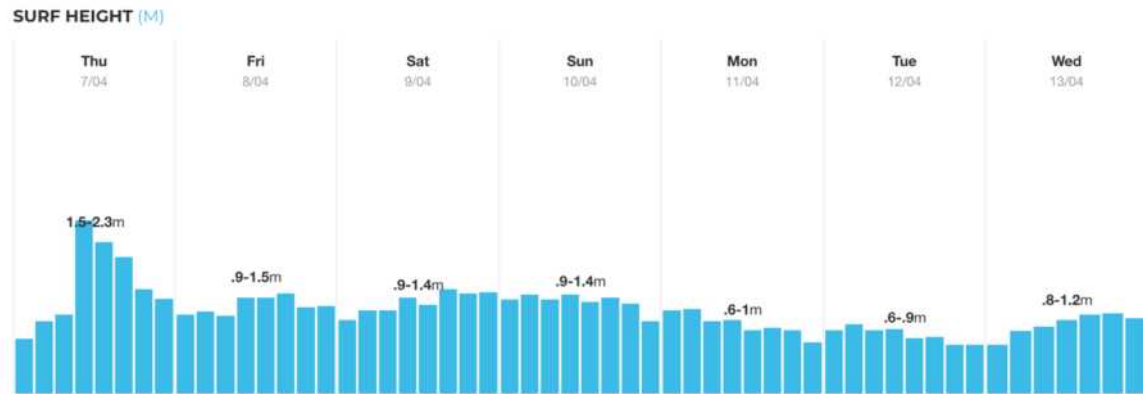


Figura 31. Previsión oleaje en Eberdeen

Volviendo a la zona de estudio, podemos observar en la gráfica (Figura 32) como la altura del oleaje puede variar alcanzando casi los 2 metros. Además, en los meses de invierno y otoño se obtienen olas de mayor tamaño. Sin embargo, estas olas no suelen superar los 3 m de altura, por lo que el oleaje no plantea un gran problema a la hora de instalar el parque.

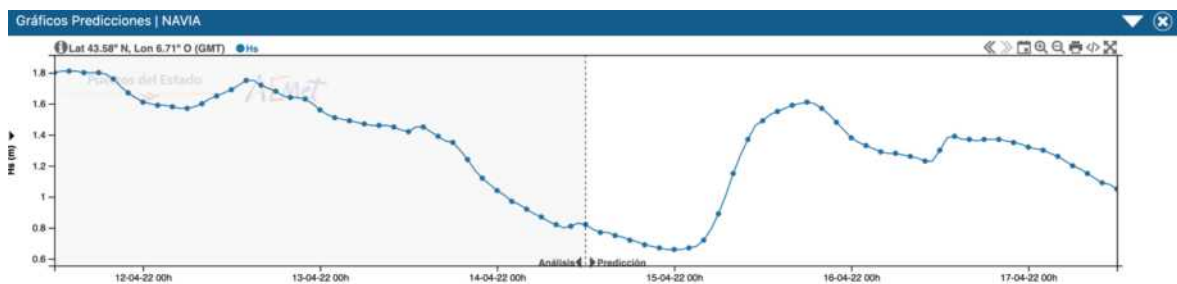


Figura 32. Variación altura oleaje en el lugar del emplazamiento

La dirección en la cual se dan las olas es otro de los factores que se deben tener en cuenta para una mejor estabilidad de las plataformas. En el mar cantábrico la dirección del oleaje más favorable y la más predominante es la que viene del NW (noroeste). Otras posibles son dirección del W (oeste), N (norte), NE (nordeste). Las torres que se van a instalar tienen una

altura aproximada de 80 metros por lo que se debe garantizar la estabilidad de las mismas durante las cuatro estaciones del año, y sobre todo durante aquellas en las que las condiciones puedan ser más extremas.

4.4 RECURSO EÓLICO

Una de las exigencias a la hora de instalar un parque eólico marino es que el recurso eólico en la zona sea el adecuado para una eficiente explotación y consiguiente generación de energía. En la imagen (figura 33), se puede observar la predicción del viento en la zona norte de España durante la segunda semana del mes de abril. En las costas de Asturias, Cantabria y el País Vasco, el viento está en torno a los 2 m/s. por otro lado, en la zona de Galicia la velocidad del viento es algo superior, llegando en algunas partes a los 8 m/s. Más en detalle, en la figura 34 se observa la parte oeste de Asturias que se quiere estudiar. Se ha marcado un punto de referencia, el cual indica una velocidad de 3 m/s.

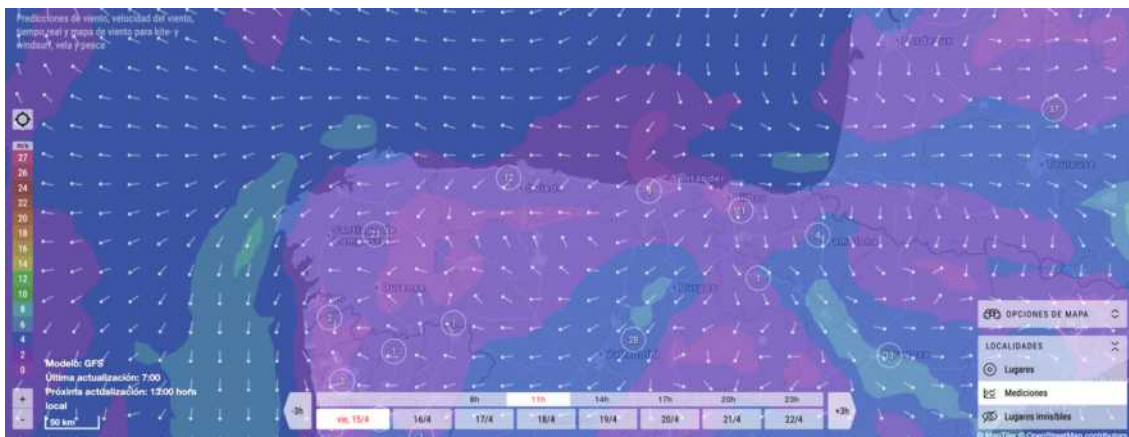


Figura 33. Mapa de viento norte peninsular

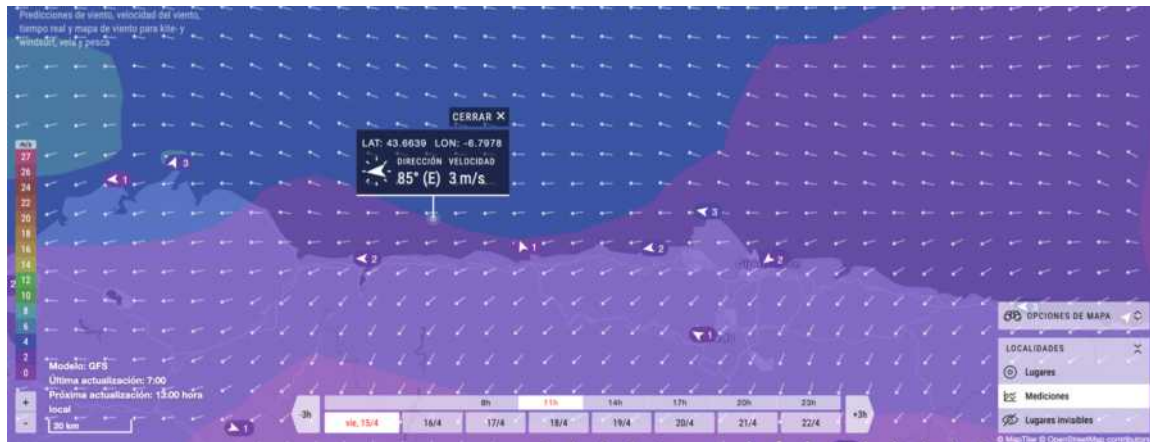


Figura 34. Mapa de viento en la zona de emplazamiento

No obstante, estas previsiones no son útiles para el análisis del proyecto ni del potencial del parque ya que es necesario realizar el estudio del viento a la altura a la que se va a situar el aerogenerador, esta es a unos 80-100 metros aproximadamente.

Para poder hacer una estimación de las velocidades medias del viento, se ha accedido a la herramienta proporcionada por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Este portal proporciona gráficos que incluyen los datos del viento en distintas zonas a distintas alturas. Además, para mejorar la estimación se ha recurrido también a la base de datos meteo-oceánicos del instituto de Hidráulica Ambiental de Asturias, la cual nos permite obtener los datos del viento a una altura deseada indicando su dirección.[29]

Las técnicas de análisis del potencial del viento para la generación eólica requieren de mucho tiempo y dependen de tecnologías meteorológicas muy avanzadas y costosas. Además, los modelos convencionales de estudio del flujo de viento pueden ser poco precisos en aquellos lugares en los que el viento es muy variable.

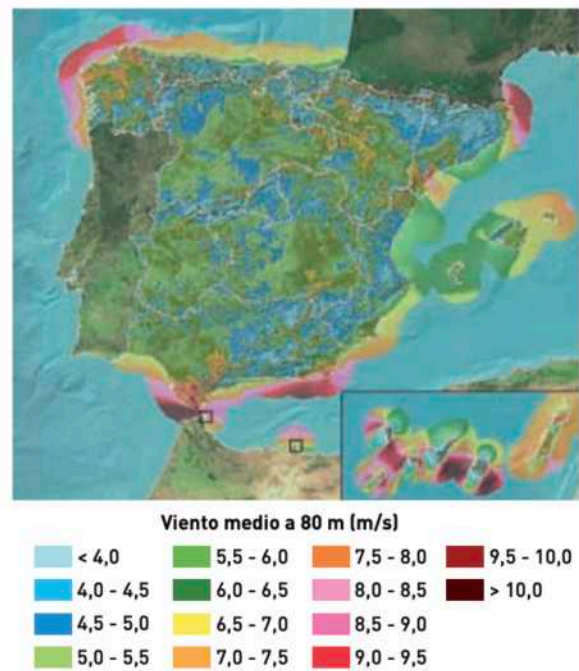


Figura 35. Mapa viento a 80 metros de altura

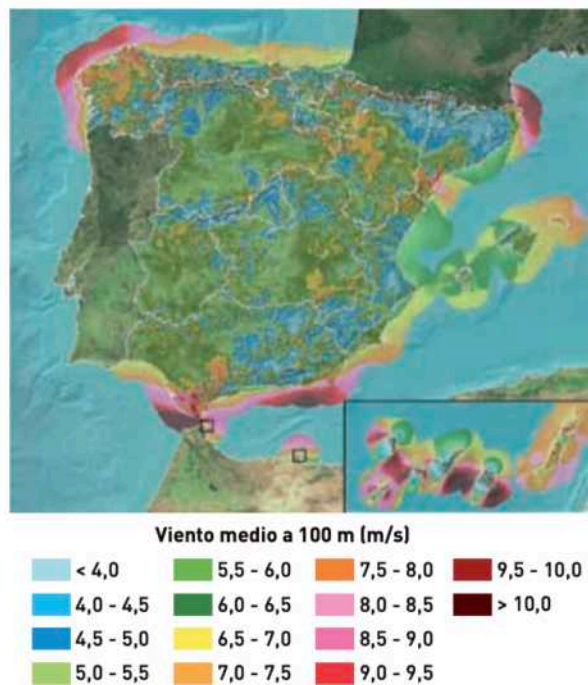


Figura 36. Mapa viento a 100 metros de altura

Las figuras 35 y 36, nos permiten apreciar las zonas con mayores flujos de viento de España. El sur de Andalucía presenta unos vientos de elevada velocidad destacando sobre todo la zona del estrecho de Gibraltar. Esto se debe a que su forma de embudo y la presencia de los macizos costeros a ambos lados del estrecho crean con frecuencia vientos muy fuertes. Destaca también el extremo nordeste de Cataluña bajo influencia de potentes ráfagas de viento que reciben el nombre de “Tramontana”. Y, por último, la zona norte y en concreto noroeste presenta velocidades elevadas en torno a los 7 m/s.

Para el cálculo de potencial eólico marino se ha recurrido al “Estudio estratégico ambiental del litoral español” llevado a cabo en abril del 2009 por los Ministerios de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Industrial, Turismo y Comercio. Este estudio calificó únicamente como zona apta para la implantación de parques eólicos marinos al 75% del litoral español, atendiendo a factores exclusivamente ambientales. En la siguiente tabla se incluye la distribución por rango de velocidades del viento a una altura de 100 metros de las zonas que el estudio consideró como aptas.

Velocidad (m/s)	Superficie (Km2)	Superficie (%)
< 4	369	0.21
4 - 4.5	319	0.18
4.5 - 5	577	0.33
5 - 5.5	3319	1.90
5.5 - 6	12707	7.29
6 - 6.5	29889	17.14
6.5 - 7	26351	15.11
7 - 7.5	29344	16.82
7.5 - 8	28169	16.15
8 - 8.5	13652	7.83
8.5 - 9	10517	6.03
9 - 9.5	10264	5.88
9.5 - 10	6617	3.79
> 10	2331	1.34
TOTAL		100
> 7.5		41.02

Tabla 4. Distribución velocidad del viento en el territorio español

Según un estudio realizado por los Planes de ordenación del espacio marítimo en España las zonas de uso prioritario para la instalación de un parque eólico marino flotante, el viento a una altura de 100 metros debe estar en torno a los 7 m/s. En la tabla 4, podemos ver que solamente el 41% de la superficie que es considerada como apta por la IIEE cumple estos requisitos.

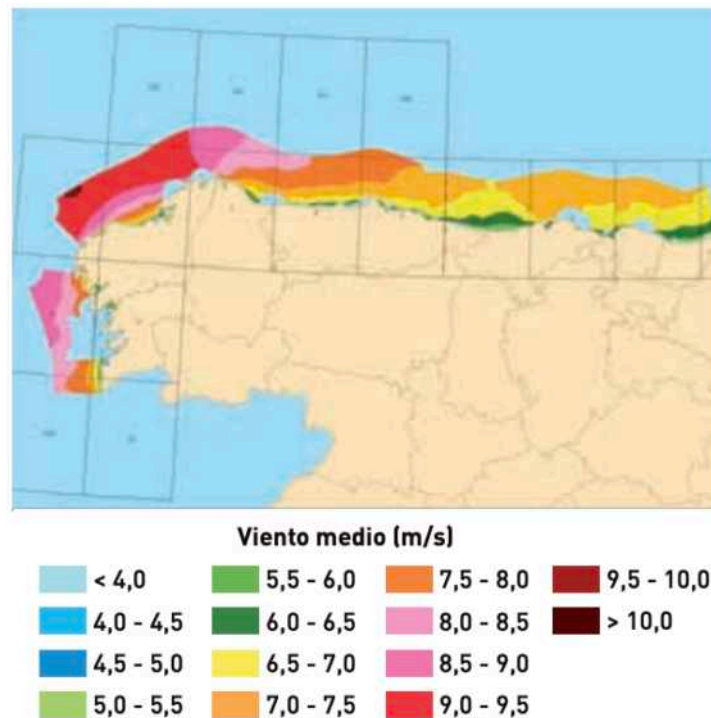


Figura 37. Distribución de las áreas con viento medio anual superior a 7,5 m/s, a 80 m de altura

En la siguiente tabla, se han recogido los datos de latitud y longitud de los principales parques eólicos en el mundo, así como la altura del aerogenerador, la turbina empleada y la potencia generada.

Parque eólico	Latitud	Longitud	Altura(m)	Turbina	MW	Año
London Array	51.75	1.5	87	SWT-3.6-120	630	2012
Gemini	54	6	120	SWT-4.0-130	600	2017
Race Bank	53.25	1	100	SWT-6.0-154	573	2018
Borkum Riffgrund 1&2	54	6.5		SWT-4.0-120	767	2019
Beatrice	58.25	-270	90	SWT-7.0-154	588	2019
East Anglia One	52.25	2.5	90.5	SWT-7.0-154	714	2020
Kriegers Flak	55	13	104.5	SG 8.0-167 DE	604	2021

Tabla 5. Datos de los principales parques eólicos

Con la ayuda de NEWA (New european wind atlas) se han obtenido los datos del viento en las coordenadas en las cuales se encuentra situado el parque eólico de East Anglia 1, construido por la empresa española Iberdrola. Estos datos se encuentran recogidos en la tabla inferior. Se puede apreciar como a una altura de 75 metros que el régimen global es considerablemente más elevado que la zona de Asturias, con una velocidad media de casi 9m/s. Hay que tener en cuenta que este parque es de cimentación fija, y no flotante como el del proyecto presente.

Altura	XLON	XLAT	west_east	south_north	Velocidad media	Variación
50	2,4476013184	52,20859909	-828000	-129000	8,870925903	2,182921648
75	2,4476013184	52,20859909	-828000	-129000	9,11977005	2,27509141
100	2,447601318	52,20859909	-828000	-129000	9,297082901	2,349974394
150	2,447601318	52,20859909	-828000	-129000	9,516191483	2,45273304
200	2,447601318	52,20859909	-828000	-129000	9,6482687	2,518773079

Tabla 6. Consumo mundial de energía

Se procede a evaluar la posibilidad de instalar la turbina a una altura 100 metros con el fin de optimizar el recurso eólico. Con la ayuda del portal Mapa Eólico Ibérico, se han obtenido para una Latitud de 43.7° y longitud de -6.7°, correspondientes a la localización elegida para el proyecto, una velocidad media del viento a 100 metros de altura de 8.2149 m/s.

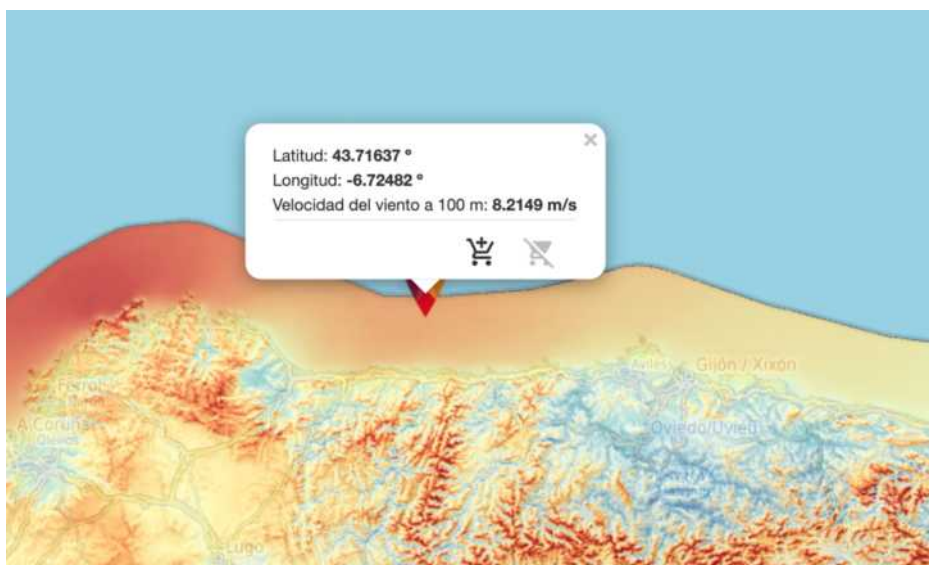


Figura 38. Velocidad en las coordenadas seleccionadas

Capítulo 5. INSTALACIÓN DEL PARQUE

5.1 FASES DE INSTALACIÓN

La tecnología de las turbinas eólicas marinas ha alcanzado un elevado grado de desarrollo tecnológico lo que ha supuesto un descenso sustancial en el coste de la energía de los proyectos de parques eólicos marinos. Este descenso se debe a factores como el mayor diámetro del rotor en las turbinas, mayores inversiones por parte de particulares e instituciones, mejora de la tecnología de instalación y mayor conocimiento del mercado. Aun así, la energía eólica marina tiene un coste nivelado de la energía mayor que la de la eólica terrestre, con una media de 0.12€/kWh [30]. Para poder reducir este valor, es importante identificar los principales factores de coste durante el ciclo de vida de una turbina eólica marina. Además, es necesario impulsar el desarrollo de investigaciones para la innovación de estas tecnologías.



Figura 39. . Instalación turbina eólica marina

FASE 1

La primera fase implica la selección del emplazamiento y la preparación de una solicitud de autorización. En este proyecto, se ha seleccionado como localización del parque las costas del principado de Asturias, en concreto, a unos 30 kilómetros de Lluvia. Durante la evaluación del lugar de emplazamiento se ha estudiado la velocidad del viento, la profundidad del agua, el lecho marino y el oleaje de la zona. Por otro lado, la solicitud de permiso incluye la evaluación del impacto económico, social y medioambiental del emplazamiento del parque.

FASE 2

La fase 2 consiste en la fabricación y producción de los aerogeneradores con su cableado y amarre. En este caso, los aerogeneradores suelen ser adquiridos de proveedores externos dedicados únicamente al desarrollo tecnológico de turbinas eólicas. Por ello, esta fase se basa en la selección de la turbina eólica más adecuada para nuestro parque según su localización, coste y eficacia.

FASE 3

Esta fase implica la instalación de múltiples componentes de las turbinas eólicas marinas como son el cableado, la estructura de cimentación o plataforma flotante según la tecnología a usar, la torre, la góndola y las palas. En esta fase es necesario transportar todos los componentes a la localización situada mar adentro por lo que se necesitan buques y equipos de manipulación que dispongan de los requisitos de nuestro proyecto.

FASE 4

A continuación, para garantizar el funcionamiento adecuado y eficaz de nuestra turbina eólica marina una vez se ha puesto en marcha, es necesario llevar a cabo actividades de inspección y mantenimiento durante toda su vida útil. Esta etapa incluye diversas actividades de operación marítima como es el transporte desde el puerto al parque eólico, mantenimiento y montaje del cableado, reparaciones rutinarias del aerogenerador, etc.

FASE 5

Finalmente, cuando el aerogenerador llega al final de su vida útil, se debe tomar la decisión de desmantelar el aerogenerador o repotenciarlo para poder seguir obteniendo recurso eólico. Desmantelar el aerogenerador consistiría en la completa desaparición de la turbina del parque situado en alta mar. Por otro lado, repotenciar el aerogenerador consistiría en sustituir las turbinas por otras nuevas y más eficientes.

Los gastos de capital y los gastos operativos son dos factores que influyen en los niveles de costes de la energía eólica marina. Según los datos obtenidos de las distintas tecnologías de plataforma de los aerogeneradores, los costes de la fase de instalación de un parque eólico de cimentación fija suponen el 6% del total, mientras que el coste de la fase 3 de un aerogenerador con estructura flotante supone únicamente el 2,4%, suponiendo los mismos métodos de instalación empleados. [31]

A pesar de la reducción significativa del uso de una estructura flotante para la base del aerogenerador del parque, la selección de un método adecuado es lo que hace que el coste se reduzca en mayor o menor medida. Por lo tanto, es una consideración importante y práctica para el desarrollo de los aerogeneradores eólicos marinos.

Al igual que las tecnologías de los aerogeneradores, las tecnologías de instalación se han desarrollado desde el inicio del sector eólico marino. En el caso de los aerogeneradores instalados, se han llevado a cabo numerosas actividades de investigación que abarcan la aerodinámica, la hidrodinámica, las cargas estructurales, la dinámica y el control, el funcionamiento y el mantenimiento, la transmisión y los cimientos y amarres.

5.2 SELECCIÓN PLATAFORMA FLOTANTE

El recurso eólico en las profundidades del mar es mucho más constante y abundante que en las zonas más cercanas a la costa. Además, mar adentro, los aerogeneradores producen menor impacto visual en las actividades humanas. Por todo ello, se puede predecir que la explotación de la energía eólica marina se irá adentrando cada vez más en los mares hacia mayores profundidades, donde las plataformas flotantes son más adecuadas para las turbinas eólicas. Como consecuencia, España tiene la gran oportunidad de convertirse en un referente en este tipo de plataformas mientras que el resto de los países siga apostando por estructuras fijas.

Los diferentes movimientos y fuerzas que se ejercen sobre las turbinas eólicas marinas flotantes conducen a una reducción en la eficacia del sistema de generación, en la vida útil de la estructura, la mitigación de la fuerza del viento y de las olas, y el aumento de los costes de mantenimiento y de las tensiones que sufre la estructura. Por ello, otro de los objetivos del proyecto es hacer una elección coherente y adecuada para exprimir al máximo la producción energética del parque manteniendo unos costes considerables.

Para las plataformas de tipo *spar* se considera que la profundidad del agua tiene que alcanzar los 100 metros y para la de tipo *TLP* los 70 metros. Por otro lado, las plataformas flotantes de tipo *berge* y *semisumergible* no tienen requisitos especiales en cuanto a la profundidad del agua, pero la plataforma *berge* se adapta mejor a profundidades relativamente mayores. [32].

La siguiente tabla incluye una comparativa de las cuatro principales estructuras flotantes posibles para emplear en el parque eólico propuesto:

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
SPAR	<ul style="list-style-type: none"> Estabilidad intrínseca 	<ul style="list-style-type: none"> Movimientos relativos grandes

	<ul style="list-style-type: none"> • Amarre y anclaje baratos y sencillos • Bajo riesgo operativo • Oportunidad: fabricación en serie, sinergias con fabricación de torres 	<ul style="list-style-type: none"> • Montaje en aguas profundas • Estructura muy grande (coste elevado) • Buques específicos requeridos • No existe un mercado global
SEMI-SUMERGIBLE	<ul style="list-style-type: none"> • Independencia en profundidad • Montaje en tierra • Instalación y desmantelamiento sencillos • Insensibilidad a las condiciones del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor estabilidad • Mayor impacto en la turbina debido a los movimientos • Estructura grande y compleja, fabricación y mantenimiento más difíciles • Gran huella en el fondo marino
TLP	<ul style="list-style-type: none"> • Alta estabilidad, bajos movimientos • Estructura simple, pequeña y ligera, fácil mantenimiento • Alta estabilidad • Montaje e instalación en tierra • Poca competencia • Poco susceptible a la corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto riesgo si falla el tendón o el anclaje • Instalación y desconexión compleja y arriesgada para el mantenimiento en tierra • Tensiones elevadas en la estructura • Inadecuado para condiciones de suelo difíciles • Inadecuado para fuertes corrientes de marea

La selección del tipo de estructura flotante depende principalmente de las cargas dinámicas a las que está sometida una turbina eólica flotante en alta mar. El viento y las olas son las principales cargas externas medioambientales, por lo que el análisis principal se limita a investigar la respuesta de la estructura a las excitaciones del viento y de las olas. La estructura TLP proporciona más estabilidad que el resto y por ello tiene el menor impacto en la dinámica de funcionamiento de la turbina.

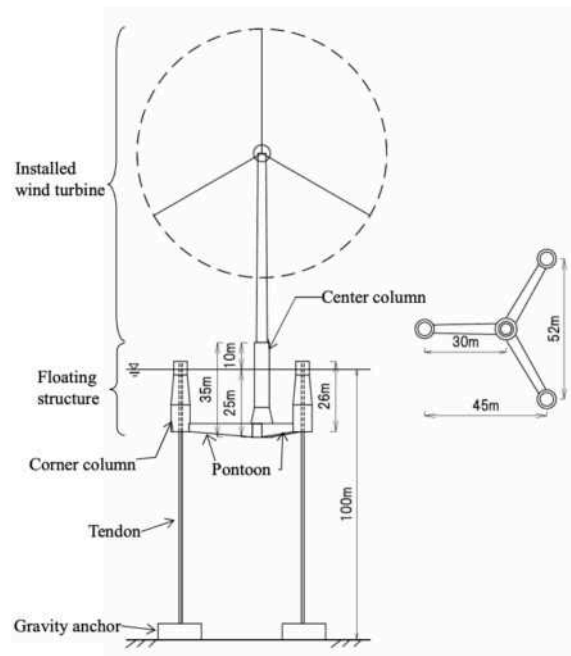


Figura 40. Componentes estructura TLP

La estructura TLP cuenta con los siguientes componentes (Figura 40):

- Columna central, tres columnas de esquina y varios pontones horizontales que conectan todas las columnas.
- La parte superior de las columnas de esquina está por encima de la superficie del agua, y los tendones están amarrados en su parte superior para facilitar el posterior mantenimiento.

- Antes del amarre, las columnas de esquina contribuyen a la estabilidad durante el transporte marítimo, la instalación y la retirada.
- Los pontones permiten un calado suficiente que evite la exposición a la superficie de las olas en condiciones extremas, lo que provocaría un impacto de carga excesivo.
- La estructura cuenta con dos tendones en cada esquina.

La predicción de las cargas dinámicas para una plataforma estable como la TLP requiere de nuevas herramientas que aún siguen en investigación, pero es probable que sea más fácil que para las plataformas más sujetas a la carga de las olas. Las plataformas, como la *berge*, que tienen una gran parte de su estructura cerca de la superficie libre, tendrán mayores fuerzas de cabeceo, balanceo y oleaje. [33]

Las plataformas TLP han mostrado un rendimiento muy prometedor en comparación con las otras plataformas flotantes en el mercado. Por ello, para el parque eólico marino propuesto en el proyecto se va a seleccionar la plataforma TLP.

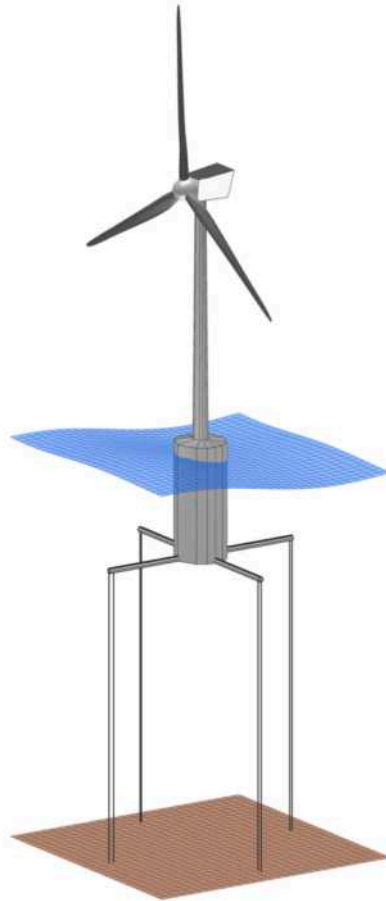


Figura 41. Plataforma TLP

Las TLP, que se anclan mediante tirantes como se puede observar en la figura son las plataformas más sensibles al peso. Este tipo de estructuras dejan de ser eficaces a profundidades mayores a los 1000 metros debido a los problemas de resonancia asociados a la elasticidad de los tendones. El parque eólico propuesto se sitúa a 32 km de la costa donde la profundidad alcanza los 150 metros, por lo que esto no sería un problema.

5.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE LA PLATAFORMA TLP

- Las plataformas deben cumplir ciertos requisitos de rendimiento estático, que dependerán si el aerogenerador, una vez montado, va a ser remolcado hasta el lugar de emplazamientos o si se llevara a cabo la instalación directamente en alta mar. Según el método de instalación que se va a llevar a cabo, se eligen las propiedades hidrostáticas y del sistema de amarre. [34]
- La frecuencia natural del sistema debe ajustarse para evitar interacciones de resonancia con las olas que interfieran con las frecuencias operativas del aerogenerador. Esto se puede evitar con un adecuado diseño, análisis y simulación de la plataforma.
- Es importante tener en cuenta que las frecuencias naturales del sistema disminuyen con el aumento de la profundidad del agua o la reducción de la profundidad que alcanza en el agua la parte sumergida de la plataforma.
- Como la TLP se trata de una estructura sumergida, las fuerzas de excitación de las olas son generalmente menores a lo que serían en una estructura flotante de superficie. Por tanto, el diseño debe centrarse en minimizar al máximo el área de plano de agua.
- Cuanto mayor es el peso de la estructura, más baja es la frecuencia natural en el oleaje lo que hace disminuir la aceleración de la góndola del aerogenerador. Sin embargo, mayor masa implica mayor coste de la plataforma y del proceso de instalación. Por ello, es importante hacer un diseño que proponga un balance adecuado entre coste y masa. [35]
- Por otro lado, una estructura menos maciza es más sensible a los efectos del viento sobre la turbina eólica. La amortiguación aerodinámica es un parámetro importante

a la hora del diseño de la plataforma para lograr que esta contribuya de manera positiva a la dinámica del sistema acoplado.

- La masa del acero utilizado en la construcción de la plataforma y la tecnología de anclaje son los principales factores de coste de una plataforma TLP. El diseño debe minimizar estos factores.

5.4 INSTALACIÓN DE LA PLATAFORMA TLP

Las plataformas TLP varían en su diseño según el desplazamiento y estabilidad de la plataforma, número de tendones, número de columnas, tendones, amarre, etc. Uno de los principales inconvenientes que tiene este tipo de plataformas es que están mucho menos comercializadas en comparación con las plataformas *spar* y *semisumergibles*, debido a las complejidades de los sistemas de anclaje y de las instalaciones.

A pesar de que empresas como Blue H Engineering han desarrollado prototipos con este tipo de tecnologías, la instalación de éstas está todavía en desarrollo, y las experiencias solo se pueden extraer de la industria offshore [36].

Los tendones suelen instalarse antes de la plataforma. En el caso de que se utilice un conector mecánico para unir las secciones de los tendones, éstos pueden remolcarse en seco mar adentro hasta el lugar, donde se levantan y son remolcados por un buque grúa. Por otro lado, si las secciones van a ser soldadas, éstas pueden ser remolcadas en húmedo con módulos de flotación hasta la localización deseada. Una vez en el lugar de emplazamiento, se retiran los módulos de flotación, y con la ayuda de una grúa buque se vuelcan los tendones.

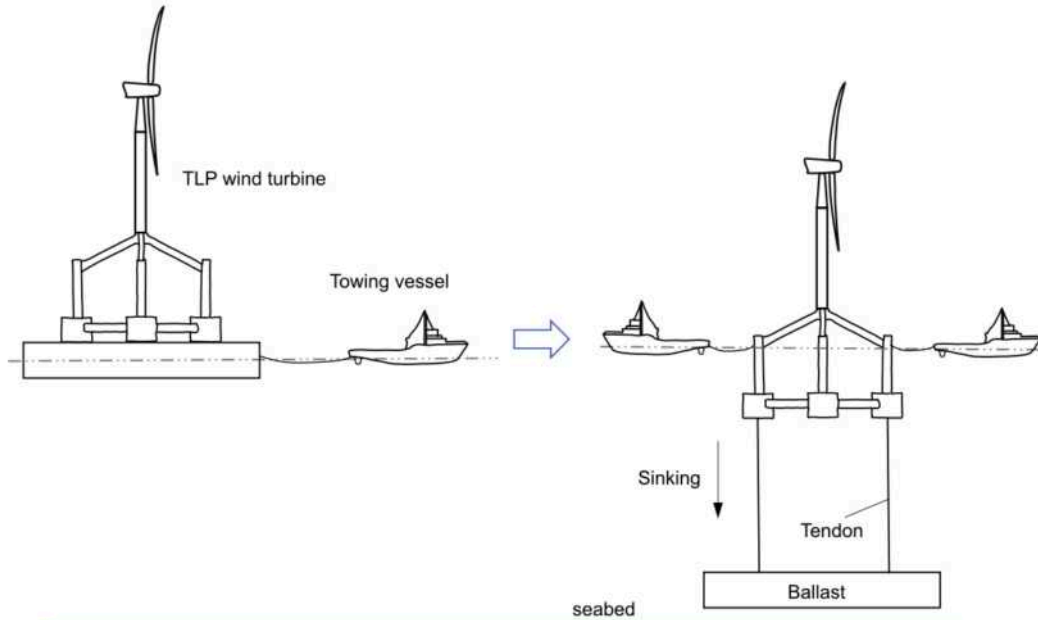


Figura 42. Instalación del GICON TLP

Dependiendo del diseño que se realice, la estabilidad durante el transporte y la instalación puede convertirse en un problema. En primer lugar, el sistema TLP se monta en posición vertical en una zona costera. A continuación, con la ayuda de un remolcador se remolca hasta el lugar deseado. Como el procedimiento tradicional de instalación de las plataformas TLP es complejo y los cascos de los TLP pueden experimentar inestabilidad durante la inmersión, se ha intentado mejorar el método de instalación. [37]

La imagen 25 hace referencia al concepto de instalación del GICON-TLP, un concepto innovador en el que el sistema se coloca en una losa flotante y se remolca hasta el lugar. A continuación, la losa se lastra, lo que hace que la plataforma se sumerja lo requerido. Sin embargo, para lograr la comercialización de estas, es necesario desarrollar métodos de instalación más rentables.

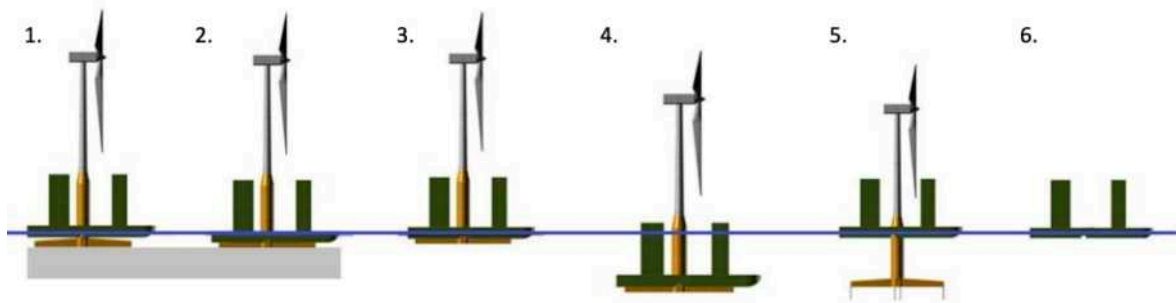


Figura 43. Proceso instalación plataforma

Una de las propuestas de este proyecto para aumentar la eficacia de este tipo de plataformas, es establecer puntos comunes de anclaje entre las distintas plataformas. Esto permitiría una reducción del tiempo de instalación, la reducción de las labores de mantenimiento produciría un menor impacto en la vida submarina, así como una reducción de los costes. Además, permitiría una mayor fijación entre los generadores.

5.5 SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR Y POTENCIA GENERADA

El aerogenerador seleccionado para el parque eólico propuesto se trata del SG 8.0-167 DD. Es una turbina del fabricante SIEMENS GAMESA caracterizada por proporcionar el mayor rendimiento a todas las velocidades del viento. Para poder realizar un cálculo de la potencia generada por nuestro parque eólico, se va a considerar la instalación de 10 aerogeneradores.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

IEC clase	I,S
Potencia Nominal	8.000 kW
Diámetro del rotor	167 m
Longitud de las palas	81.4 m
Área barrida	21.900 m ²
Altura	Sin limitación
Regulación de potencia	Velocidad variable
Vida útil	25 años
Distancia a la costa	50km/20km
Producción anual de energía a la red por turbina	Approx. 34,000MWh

Tabla 7. Especificaciones SG 0.0-167 DD

Este modelo fue instalado por primera vez en el año 2017, y ya han sido solicitadas 800 unidades desde entonces. Cabe destacar el proyecto Hornsea Two en Reino Unido en 2022 que ha seleccionado estos aerogeneradores para su proyecto.

Los parques eólicos registrados que utilizan este modelo de turbina son:

- Alemania : Kaskasi II
- Bélgica : Seamade (Mermaid)
- Bélgica : Seamade (SeaStar)
- Dinamarca : Kriegers Flak
- Dinamarca : Vesterhavet Nord
- Dinamarca : Vesterhavet Syd
- Estados Unidos : Sunrise Wind
- Francia : Le Tréport
- Francia : Noirmoutier
- Francia : Provence Grand Large
- Francia : Saint-Brieuc
- Reino Unido : Hornsea Project Two - Breesea and Optimus Wind
- Reino Unido : Neart na Gaoithe
- Taiwán : Formosa 2 OWF
- Taiwán : Yunlin

La curva de potencia de la turbina es la siguiente:[39]

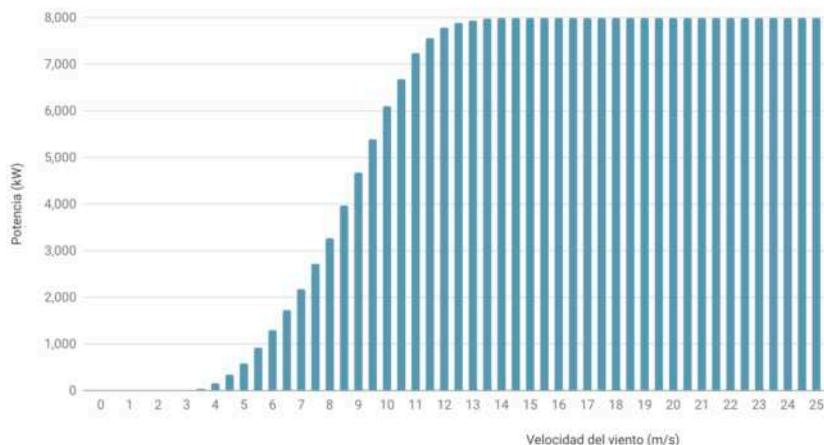


Figura 44. Curva de potencia

Con la ayuda de GlobalWindAtlas, se ha obtenido la velocidad media a una altura de 100 metros en el parque eólico situado en Saint-Brieu. Este parque eólico funciona con el modelo de Siemens SG 8.0-167 DD y presenta una velocidad media de 8.51 m/s. (Figura 45)

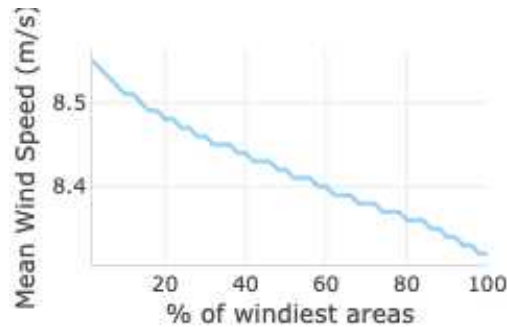


Figura 45. Velocidad media Saint-Brieu

Este parque eólico sirve de referencia para analizar si el aerogenerador fuera óptimo en la localización seleccionada.

La góndola del aerogenerador puede estar situado en torno a los 125-150 metros de altura, por lo que el viento calculado a 100 metros habría que corregirlo. A la hora de elegir el aerogenerador es importante ver la potencia que va a ser capaz de extraer del viento. Esta potencia viene dada por la siguiente expresión:

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

Sin embargo, esta expresión también se debe de corregir. Según la Ley de Betz, como máximo solo se puede aprovechar el 59% de la energía cinética del viento, ya que el 100% supondría una velocidad nula de las palas del aerogenerador. Por tanto, el coeficiente que hay que aplicar es el siguiente: [40]

$$c_p = \frac{\text{Potencia extraída}}{\text{Potencia disponible}}$$

Por tanto, la potencia real aprovechable del viento tiene la siguiente expresión:

$$Potencia\ aprovechable = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p$$

La figura 44, muestra la curva de potencia del aerogenerador SG 8.0-167 DD, por lo que a partir de esta se puede obtener directamente la potencia aprovechada por el aerogenerador para las distintas velocidades. Como se ha mencionado en el capítulo 4, en la ubicación seleccionada la velocidad media del viento es de 8.2 m/s. Observando la curva, se obtiene para una velocidad de 8 m/s la siguiente potencia aprovechable:

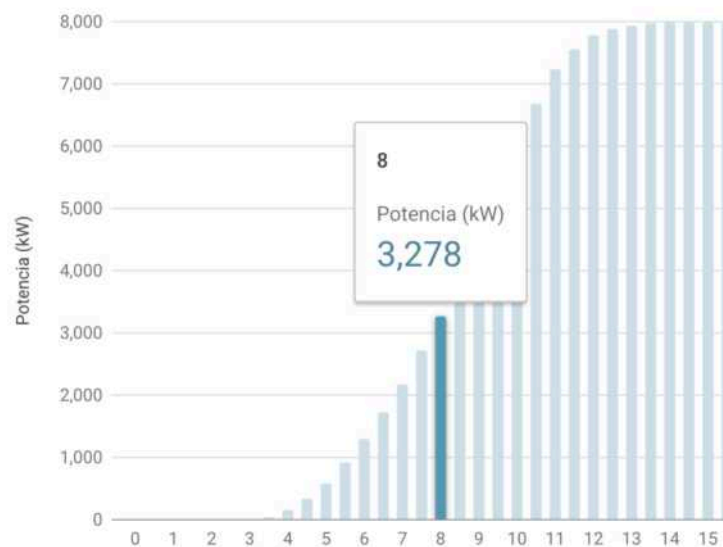


Figura 46. Potencia aprovechable a 8 m/s

Al tratarse de una velocidad algo superior a los 8 m/s, se podría concluir que la potencia aprovechable es de unos 3.6MW. Hay que tener en cuenta que en la potencia obtenida no se incluyen las pérdidas. Según la IDAE, este valor de pérdidas se puede redondear a un 15%. La potencia total neta quedaría:

$$Potencia\ neta = (1 - 0.15) \cdot 3.6 = 3.06MW$$

Realizando el sumatorio de la potencia de cada aerogenerador, se obtiene:

$$Potencia\ del\ parque = 10 \cdot 3.06 = 30.6\ MW$$

Finalmente, la energía total producida en un año por el parque es:

$$Energía\ real\ generada\ (Neta) = 30.6 \cdot 24 \cdot 360 = 264384\ MWh$$

POTENCIAL EÓLICO

Para poder concluir si la potencia instalada, se han empleado las ratios del factor de planta (CF) y de la cantidad de horas de funcionamiento (hef):

$$CF = \frac{Energía\ real\ generada}{Energía\ en\ condiciones\ nominales} = \frac{264384}{8 \cdot 10 \cdot 24 \cdot 365} = 0.377$$

La energía eólica junto con la energía solar, son las dos fuentes de energía con menor factor de capacidad o planta. Esto se debe a la variación del recurso eólico. Sin embargo, es el factor más determinante a la hora de determinar si el parque eólico diseñado es rentable. Según un estudio realizado se considera que la situación empieza a ser rentable cuando se alcanza el valor de 0.21. Por ello, se puede concluir que, en cuanto a potencia instalada, el parque diseñado es rentable [41].

Capítulo 6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Es difícil hacer un análisis de los costes de la eólica flotante ya que son proyectos muy poco desarrollados y desconocidos, por lo que se necesitan nuevos modelos y mejorados para poder hacer un cálculo preciso de los costes. Por ellos, se va a desglosar los factores que hay que tener en cuenta para minimizar el coste del proyecto de un parque eólico flotante en el mar.

6.1 COSTES DE INVERSIÓN

En 2021, 41.400 millones fueron invertidos por Europa en nuevos parques eólicos. Esto supuso un 11% menos de lo que se hizo en 2020. Sin embargo, estas inversiones cubren unos 24,6GW de capacidad en un único año, lo que supone un nuevo récord de producción. La gran parte de los nuevos parques eólicos instalados fueron terrestres, 19,8GW, ya que la eólica terrestre es más barata que la eólica en alta mar.

De acuerdo con la Asociación Europea de Energía Eólica [42], los elementos clave que determinan los costes básicos de la energía eólica se detallan a continuación:

- Costes de inversión inicial, diseño y gestión del proyecto.
- Coste de las turbinas
- Los costes de instalación de los aerogeneradores
- Coste de conexión eléctrica
- El coste del capital
- Los costes de explotación y mantenimiento (O&M)
- Los costes de desarrollo y planificación del proyecto
- La vida útil y el tamaño de las turbinas
- La producción de electricidad, la base de recursos y las pérdidas de energía

El precio de las turbinas depende de diversos factores. En primer lugar, su coste es proporcional a la superficie barrida por las aspas, y en general, a la raíz cuadrada de la altura del buje. El tamaño del generador desempeña un papel bastante menor en el precio de la turbina, ya que en general la producción anual de energía es en gran medida proporcional a la superficie del rotor. Al coste hay que añadir el envío y la instalación eléctrica interna.

Para conocer el precio del aerogenerador seleccionado, es necesario ponerse en contacto con la empresa proveedora, pero los precios de turbinas eólicas offshore se pueden calcular con la siguiente expresión: [43]

$$\text{Coste aerogenerador} = 1374 \times \text{Capacidad}(MW)^{0.87}$$

La conexión eléctrica está compuesta por el cableado de la subestación offshore (aerogenerador) y la subestación onshore (línea de alta tensión). Existe una política de confidencialidad, que mantiene ocultos los precios en los catálogos de las empresas suministradoras.

6.2 COSTE INSTALACIÓN

Los costes de instalación, mantenimiento y desmantelamiento dependen de una serie de factores. Los costes de instalación consisten en los costes incurridos para la instalación de la turbina eólica, la plataforma flotante, el sistema eléctrico, sistemas de amarre y anclaje y el coste de puesta en marcha.

Los costes de instalación de la plataforma eólica marina flotante dependen de los costes portuarios y de los astilleros, de los costes de transporte/remolque y de los costes de instalación en el emplazamiento. Es común que los puertos apliquen restricciones de calado por lo que la plataforma flotante de tipo TLP, que tiene mayor calada que otros tipos de estructuras flotantes, tienen unos costes adicionales.

En el caso de una plataforma flotante, el acero es el principal factor de coste. Para que las configuraciones flotantes pueden competir en el ámbito económico con las estructuras fijas,

la masa de acero debe ser inferior a las 1000 toneladas métricas [44]. Para una estructura flotante TLP a 150 metros de profundidad como es el caso del parque propuesto, la masa del acero puede ser mayor, pero la cifra sirve como guía. Hoy en día, la tonelada métrica de acero está a 521 dólares americanos [45].

Si se decide emplear hormigón para la estructura TLP, estos gastos también pueden contribuir significativamente a los costes. El precio del hormigón oscila entre los 100 y los 150 dólares [46]. Además, el ancla y el sistema de amarre pueden ser el mayor factor de coste para un TLP, y el coste del ancla por kN de carga vertical (tensión de amarre) se estima entre 15 y 25 dólares, según Wayman.

Por último, la geografía en términos de accesibilidad al emplazamiento y las condiciones geotécnicas en del parque eólico desempeñan un papel crucial a la hora de determinar el coste de la construcción de la carretera, el cableado, etc. Antes de iniciar el proceso de instalación de los cables, es necesario realizar un estudio del fondo marino para identificar los posibles obstáculos y especificar las rutas de los cables.

6.3 COSTE DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costes de funcionamiento y mantenimiento constituyen una parte muy significativa de los costes anuales de una turbina eólica. En el caso de una turbina nueva, los costes de operación y mantenimiento pueden representar entre el 20% y el 25% del coste total nivelado por kWh producido durante la vida útil de la turbina [47].

Estos costes incluyen:

- Mantenimiento regular
- Reparaciones
- Mano de obra
- Transporte marítimo
- Piezas de repuesto
- Administración

- Seguro

Algunos de los costes mencionados se pueden estimar con relativa facilidad. Para el seguro y el mantenimiento regular, es posible obtener contratos estándar que cubran una parte considerable de la vida útil total del aerogenerador. Por otro lado, los costes de reparación y de las piezas de recambio son muy difíciles de estimar. Estos costes, además, están especialmente influenciados por la edad de la turbina, aumentando con el tiempo.



Figura 47. Mantenimiento de una turbina eólica marina [47]

Debido al escaso conocimiento de las turbinas eólica marinas flotantes, se puede tomar como referencia el funcionamiento de las turbinas eólicas marinas. Según las experiencias de Alemania, España, Reino Unido y Dinamarca, los costes de operación y mantenimiento se estiman generalmente en unos 1,2 a 1,5 céntimos de euro (c€) por kWh de energía eólica producida, a lo largo de toda la vida útil de una turbina.

España cuenta con una enorme ventaja en cuanto al transporte marítimo y sector naval. Además, cuenta con numerosas empresas dedicadas a la fabricación de estructuras flotantes.

Según el director ejecutivo de EnerOcean, Perdro Mayorga, España es uno de los primeros fabricantes y que más tecnologías propias ha desarrollado en soluciones flotantes, y todo ello sin una sola licitación en tu propio país

6.4 COSTE DE DESMANTELAMIENTO

Mencionada en la tabla 7 con las especificaciones del aerogenerador seleccionado, se espera que la vida útil de las turbinas del parque sea de entre 20 y 25 años. La identificación de las actividades de desmantelamiento debe elaborarse con antelación para asegurarse del cumplimiento de la normativa y los códigos, la contención de los costes y el calendario, la seguridad y el medio ambiente.

Las operaciones de desmantelamiento se realizan con buques muy costosos. Además, estos costes están sujetos a grandes variaciones debido a la incertidumbre en el transporte marítimo. Por otro lado, algunos componentes de los aerogeneradores deberán ser retirados por completo, mientras que otros deben dejarse intactos, ya que su desplazamiento puede ser más perjudicial para el medio ambiente y vida marina. Por ejemplo, la vida marina que se forma alrededor de los cimientos y los cables durante la vida útil del OWF hace que las operaciones de retirada total sean demasiado arriesgadas desde el punto de vista medioambiental.

Los plazos de desmantelamiento deben permitir el tiempo suficiente para aplicar un programa de desmantelamiento que sea rentable. Por lo general, suele ser uno o dos años después de la finalización del contrato de arrendamiento.

La estimación de los costes de desmantelamiento siempre tendrá un grado de incertidumbre debido al poco desarrollo del mercado y las limitaciones en la estimación de costes. Para poder elaborar un modelo de cálculo de los costes de desmantelamientos se debe tener en cuenta las condiciones actuales de mercados, la tecnología, así como los posibles ajustes por la inflación. Otros factores para tener en cuenta son la economía global, seguridad en la navegación, la viabilidad técnica y los objetivos de conservación y biodiversidad [48].

6.5 ESTIMACIÓN DE COSTES

Debido al poco desarrollo de la eólica marina flotante y a la gran incertidumbre que existe, realizar un análisis de costes resulta muy complicado. Por ello, se ha realizado una estimación a partir de costes que se conocen de otros mercados, que se han ido ajustando al proyecto realizado.

COSTES DE INVERSIÓN E INSTALACIÓN

- En primer lugar, se incluye el coste del conjunto de aerogeneradores:

$$\begin{aligned} \text{Coste aerogeneradores} &= 1374 \times \text{Capacidad(MW)}^{0.87} = 1374 \cdot (8 \cdot 10)^{0.87} \\ &= 62.18 \text{ millones de } \text{€} \end{aligned}$$

- Coste de la plataforma flotante TLP

Para poder estimar este valor, se ha recurrido a un estudio realizado por el *diario Journal of Marine Science and Engineering*, en el cual se estima el coste de una estructura flotante de tipo Hexafloat con un aerogenerador de 10 MW, un diseño muy parecido al TLP del parque eólico propuesto en este proyecto. Este estudio supone el coste total como el coste del material utilizado por la masa de la plataforma.

Hexafloat	Optimized Value	
Wind turbine	NREL 5 MW	DTU 10 MW
Central column diameter	8.38 m	14.11 m
Central column height	35.25 m	35.02 m
Hexagon radius	30.00 m	30.00 m
Ballast distance above sea level	99.45 m	100 m
Magnetite ballast mass	3.304×10^6 kg	4.542×10^6 kg
Steel mass	1.380×10^6 kg	1.687×10^6 kg
Material cost	4.47 M€	5.52 M€
Draught	23.28 m	18.40 m
Metacentric height	31.61 m	23.18 m
Pitch angle	3.56°	7.87°

Tabla 8. Datos recogidos por *Journal of Marine Science and Engineering*.

En la tabla anterior se puede observar el precio aproximado de una plataforma. Por ello, se puede estimar el siguiente coste total de la subestación offshore:

$$\text{Precio total plataformas} = 5.52 \cdot 10 = 55.2 \text{ M€}$$

Para el cálculo de la instalación de las plataformas se va a suponer un 15% del coste total de las plataformas:

$$\text{Coste de instalación} = 0.15 \cdot 55.2 = 8.28 \text{ M€}$$

- Coste cableado eléctrica

Finalmente, dentro de los costes de inversión se encuentran los costes de los cableados eléctricos. Estas están compuestas por el cableado submarino. La estimación de estos costes se ha hecho según los datos de EWEA [49]. El coste estimado del cableado subterráneo es de 320000 € por kilómetro. Como se ha indicado en capítulos anteriores, el parque estará situado a unos 32 km de la costa.

$$\text{Cableado submarino} = 32 \cdot 320000 = 10.24 \text{ M€}$$

A continuación, las subestaciones eléctricas onshore están situadas normalmente a unos 16km de la costa por lo que se hará la estimación con esta distancia. Según EWEA, el coste por kilómetros de los cables por tierra es de 235000€. Por ello, el coste del cableado en tierra será:

$$\text{Cableado en tierra} = 235000 \cdot 16 = 3.76 \text{ M€}$$

- Coste subestación offshore

En el parque eólico, es necesario que haya una subestación en la cual se encuentre el transformador. Esta subestación también irá sobre una plataforma flotante y su precio estimado incluyendo su instalación es:[50]

$$\text{Coste subestación} \approx 6.5 \text{ M€}$$

COSTES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Como se ha mencionado en el capítulo 6.3, estos costes incluyen la operación y el mantenimiento de los aerogeneradores, las plataformas flotantes y la subestación offshore. Estos costes están sujetos a incertidumbre y varía mucho según la zona de emplazamientos y las condiciones meteorológicas.

Estos costes se pueden estimar a partir del número de horas equivalente (*hef*):

$$hef = \frac{\text{Energía total neta}}{\text{Potencia nominal}} = \frac{264384}{8 \cdot 10} = 3304.8 \text{ horas}$$

A partir de este dato, se puede realizar una interpolación a partir de la recta de costes de operación y mantenimiento:

2500 horas —————> 3.4 céntimos de €/ kWh

3500 horas —————> 3 céntimos de €/ kWh

Para el caso del parque eólico propuesto:

3304.8 horas —————> 3.07 céntimos de €/ kWh

Por ello, el coste de operación y mantenimiento queda como:

$$\text{Coste operación y mantenimiento} = \text{precio} (hef) \cdot \text{Energía total neta}$$

$$\begin{aligned} \text{Coste operación y mantenimiento} &= 0.0307 \cdot 264384000 = 8116588.8 \text{ €} \\ &= 8.11 \text{ M€} \end{aligned}$$

El coste calculado se corresponde al primer año de funcionamiento. Sin embargo, se puede estimar que este coste se irá reduciendo a lo largo del tiempo. Por ello se va a asumir que, durante 25 años de su vida útil, los costes de operación y mantenimiento serán:

$$\text{Coste O\&M} \approx 85.5 \text{ M€}$$

6.6 RESUMEN DE COSTES

Total costes sin desmantelamiento:

COSTES (M€)	
Turbina	62,18
Plataforma	55,2
Instalación	8,28
Conexión	14
Subestación	6,5
O&M	85,5
Total	231,66

Tabla 9. Costes totales sin el desmantelamiento

El coste de desmantelamiento se trata de un gasto que se realiza al final de la vida útil del parque (25 años). Para no tener que realizar el pago en su totalidad al final del ciclo de funcionamiento del parque, se va a hacer una previsión anual del coste de desmantelamiento. El valor anual empleado para la estimación es:[51]

$$\text{Coste desmantelamiento anual} = 90000 \text{ €}$$

Por ellos los costes totales del parque son:

$$\text{Coste total} = (90000 \cdot 25) \cdot 10^{-6} + 231.66 = 233.91 \text{ M€}$$

6.7 INGRESOS DE LA VENTA DE ENERGÍA

Los ingresos del parque van a provenir de la venta de la energía producida. A pesar de que el precio de la electricidad en España está sujeta en este último año a grandes fluctuaciones, se va a coger como valor de estimación el valor interanual obtenido por un informe de OMIE en 2021: 111.93 €/MWh.

$$\text{Ingresos anuales} = 111.93 \cdot 264384 = 29.6 \text{ M€}$$

$$\text{Ingresos totales (25 años)} = 25 \cdot 29.6 = 739.81 \text{ M€}$$

6.8 AMORTIZACIONES

Los bienes que se pueden amortizar en el proyecto propuesto son las turbinas, las estructuras flotantes, la conexión eléctrica y la subestación offshore.

TABLA DE COEFICIENTES DE AMORTIZACIÓN

Tipo de elemento	Coefficiente lineal máximo	Periodo de años máximo
Obra civil		
Obra civil general	2%	100
Pavimentos	6%	34
Infraestructuras y obras mineras	7%	30
Centrales		
Centrales hidráulicas	2%	100
Centrales nucleares	3%	60
Centrales de carbón	4%	50
Centrales renovables	7%	30
Otras centrales	5%	40

Tabla 10. Coeficientes y periodos de amortización de los bienes [52]

En la tabla anterior, se puede observar los coeficientes y periodos de años máximos de amortización de los bienes. En este caso, interesarían los datos asociados a las centrales renovables:

$$\text{Coeficiente lineal máximo} = 7\%$$

$$\text{Periodo de años máximo} = 30$$

Para calcular la cantidad correspondiente a la amortización de los bienes, se emplea la siguiente expresión:

$$\text{Cantidad anual} = (\text{coeficiente lineal máximo}) \cdot (\text{inversión inicial})$$

Por ello, la amortización de la central eólica quedará:

$$\text{Amortización central (anual)} = 20000000 \cdot 0.07 = 1400000\text{€}$$

El periodo mínimo de amortización es:

$$t_{\min} = \frac{100}{7} = 14.28 \text{ años}$$

Por lo que la amortización total será:

$$\text{Amortización total} = 19.9 \text{ M€}$$

6.9 RENTABILIDAD

A continuación, tras analizar los ingresos por la venta de la energía producida, los gastos que supone la instalación y funcionamiento del parque y las amortizaciones, se ha analizado la rentabilidad del parque.

INGRESOS	
Venta de energía	739.810.000 €
GASTOS	
Costes de inversión	146.160.000 €
Costes O&M	85.500.000 €
Desmantelamiento	2250000
AMORTIZACIONES	
Central eólica	19.900.000 €
SUBTOTAL	486000000
Impuestos(20%)	97200000
Imprevistos (10%)	48600000
TOTAL	340200000

Tabla 11. Cuenta resultados

Según las estimaciones realizadas se va a obtener un beneficio neto después de los 25 años de vida útil del parque de 340.2 millones de euros, es decir, de unos beneficios de 13 millones de euros anuales.

$$\text{Beneficios anuales} = 13.9 \text{ millones de euros}$$

Cabe destacar, que debido a las políticas de confidencialidad de los proveedores y que el mercado de la eólica flotante está aún en crecimiento, los resultados obtenidos pueden ser poco fiables.

6.10 RENTABILIDAD DEL PARQUE A MENOR DISTANCIA DE LA COSTA

El Estudio Estratégico medioambiental, exige para parques eólicos marinos una distancia mínima a las líneas de costa de 8km. Por ello, en este apartado se va a analizar la rentabilidad del parque situándolo a una distancia de 17 km.



Figura 48. Profundidad a 17 kilómetros de Luarca

Se puede observar, que, a una distancia de 17 kilómetros, la profundidad del mar es de unos 100 metros. Esto es adecuado para la instalación de las plataformas TLP, no obstante, el tráfico marítimo y las zonas destinadas a la pesca podrían ser un inconveniente.

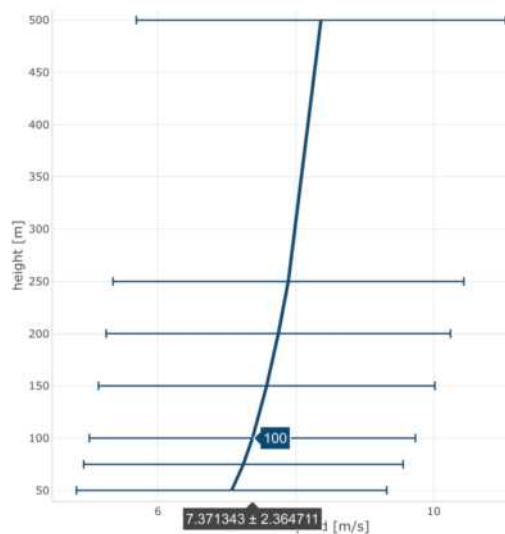


Figura 49. Velocidad viento a 17 kilómetros

En la figura 49, se puede ver que la velocidad media del viento a 100 metros de altura a una distancia de la costa de 17 kilómetros es de 7.37 m/s.

De la curva de potencia del aerogenerador seleccionado, se obtiene una potencia aprovechable de 2.186 MW. Por tanto, la potencia neta queda como:

$$Potencia\ neta = (1 - 0.15) \cdot 2.186 = 1.86\ MW$$

Realizando el sumatorio de la potencia de cada aerogenerador, se obtiene:

$$Potencia\ del\ parque = 10 \cdot 1.86 = 18.6\ MW$$

Finalmente, la energía total producida en un año por el parque es:

$$Energía\ real\ generada\ (Neta) = 18.6 \cdot 24 \cdot 360 = 160704\ MWh$$

POTENCIAL EÓLICO

Para poder concluir si la potencia instalada, se han empleado las ratios del factor de planta (CF) y de la cantidad d horas de funcionamiento (hef):

$$CF = \frac{Energía\ real\ generada}{Energía\ en\ condiciones\ nominales} = \frac{160704}{8 \cdot 10 \cdot 24 \cdot 365} = 0.229$$

Como se ha mencionado en el apartado 5.5, se considera que la situación empieza a ser rentable cuando se alcanza el valor de 0.21. Por ello, se puede concluir que a esta distancia el parque si pudiera ser rentable.

COSTES

En este caso, los únicos costes que se modificarían serían los de instalación y conexión eléctrica. Se podría decir que los costes de instalación pasarían a suponer el 10% en vez del

15% de la inversión de las plataformas y aerogeneradores. La conexión eléctrica se modificaría, al reducirse la distancia a la costa. Los costes de mantenimiento se van a estimar en un 90% de los costes de O&M a una distancia de 32km de la costa. Los costes de desmantelamiento también se reducirán en un 10%.

Costes aerogeneradores = 62.18 millones de €

Costes plataformas = 55.2 M€

Costes de instalación = 0.1 · 55.2 = 5.52 M€

Conexión submarina = 17 · 320000 = 5.44 M€

Cableado en tierra = 3.76 M€

Costes O&M = 0.9 · 85.5 = 76.95 M€

Costes desmantelamiento = 0.9 · 90000 · 25 = 2.03 M€

Los costes totales quedan en 211.08 M€.

INGRESOS

Los ingresos por la venta de energía son:

Ingresos anuales = 111.93 · 160704 = 17.98 M€

Ingresos totales (25 años) = 25 · 17.98 = 449.69 M€

BENEFICIOS

La cuenta de resultados se muestra en la siguiente tabla:

INGRESOS	
Venta de energía	449.690.000 €
GASTOS	
Costes de inversión	132.100.000 €
Costes O&M	76.950.000 €
Desmantelamiento	2025000
AMORTIZACIONES	
Central eólica	19.900.000 €
SUBTOTAL	218715000
Impuestos(20%)	43743000
Imprevistos (10%)	21871500
TOTAL	153100500

Figura 50. Resultados proyecto alternativo

Se puede observar que los beneficios son casi del orden de la mitad que el del proyecto propuesto.

$$\text{Beneficios anuales} = 6.12 \text{ millones de euros}$$

Además, colocar el parque eólico tan cerca puede producir un gran impacto visual y acústico que afecte al turismo y a la vida en las poblaciones cercanas.

Capítulo 7. CONCLUSIONES

España, es uno de los líderes mundiales en el sector de la eólica terrestre. No obstante, a pesar de que muchos países estén optando por invertir en la eólica marina, España sigue atascada en la eólica terrestre. En las costas españolas no existe ningún parque eólico en funcionamiento, sino parques experimentales. Esto se debe a las limitaciones que tienen los fondos marinos españoles a la hora de instalar aerogeneradores marinos de cimentación fija.

En el presente proyecto se estudia la viabilidad de incorporar una nueva tecnología de eólica marina basado en el uso de estructuras flotantes. En primer lugar, se ha analizado la enorme necesidad de invertir en energías renovables para alcanzar una estabilidad de precios y una mayor independencia energética en España. En cuanto a la eólica marina, se ha analizado la presencia de esta tecnología en otros países concluyendo que tiene beneficios muy esperanzadores en España.

Teniendo en cuenta factores como la presencia de parques naturales, zonas protegidas, tráfico marítimo y políticas territoriales, se ha concluido que la zona este de Asturias es adecuada para la instalación de un parque eólico. Además, el recurso eólico es de entorno los 8.2 m/s, el cual resulta en una potencia aprovechable muy buena.

En cuanto a la batimetría, la ubicación escogida tiene una profundidad de unos 150 metros. Se ha escogido como estructura flotante el diseño TLP, concluyendo que resultaría muy eficaz ya que puede ser construida en tierra, lo que reduce sus costes. Además, este tipo de plataforma permite una gran estabilidad y reduce el movimiento relativo entre la torre y el aerogenerador. Sin embargo, es un diseño aún en desarrollo por lo que podría presentar algunos inconvenientes en su instalación.

Se ha escogido el modelo de aerogenerador SG 8.0-167 DD del proveedor Siemens Gamesa. Este generador cuenta con una potencia nominal de 8MW. Se ha decidido instalar una cantidad de 10 aerogeneradores de este tipo en el parque propuesto, a partir del cual se ha

analizado la energía total producida, se ha hecho una estimación de los costes totales del parque y un estudio de rentabilidad.

El parque eólico podrá producir 264384 MWh cada año con los 10 aerogeneradores escogidos. Además, se ha estudiado el potencial eólico, obteniendo un coeficiente de plata de 0.337 superior al mínimo establecido en eólica (0.21)., por lo que se puede concluir que ha sido una elección de aerogenerador adecuada. Además, se ha calculado el número de horas equivalente de nuestro parque, obteniendo 3304.8 horas.

Con la energía producida con los aerogeneradores, se pueden obtener unos ingresos con su venta de 29 millones de euros anuales. Se ha supuesto un coste medio de 111€/MWh a lo largo de los 25 años de vida del parque, aunque está sufriendo enormes fluctuaciones durante los últimos meses.

Como comparación, se ha analizado la sensibilidad a la hora de acercar el parque eólico marino a la costa. En concreto, se ha analizado lo que ocurriría si se coloca el parque a una distancia de 17 kilómetros. En esta ubicación se obtiene una velocidad del viento de 7.3 m/s a 100 metros de altura, la cual resulta en un potencial eólico bastante inferior al propuesto. Además, se ha visto cómo afectaría esta reducción de distancia en la rentabilidad económica, concluyendo que los únicos costes que sufren una pequeña reducción son los de instalación y O&M, pero los ingresos se ven muy afectados.

Finalmente, se puede concluir que el emplazamiento de un parque eólico en las costas de Asturias, y en concreto a 30 kilómetros de la población de Lluvia, ofrece un enorme potencial a cuanto a rentabilidad, producción energética y preservación del medio ambiente. Además, este proyecto no se aleja de la realidad, ya que el gobierno asturiano y la empresa Windar ya han invertido en la instalación de un parque eólico marino en sus costas para los próximos años.

Capítulo 8. OBJETIVOS DE DESARROLLO

SOSTENIBLE

En 2015, la asamblea general de las Naciones Unidas se puso de acuerdo en lo que se conoce como la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son 17 que tratan interrelacionan entre sí los desafíos a los que se enfrenta la sociedad como el hambre, la energía asequible y no contaminante, con el fin de alcanzar un futuro sostenible.

El objetivo de desarrollo sostenible 7 “Energía asequible y no contaminante” tiene como fin garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. Una de las metas del objetivo 7 es intentar aumentar considerablemente para 2030 la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas y aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia. Por ello, este proyecto está muy relacionado con este objetivo, ya que fomenta el uso de energías verdes.

Además, el proyecto está muy relacionado con el objetivo 9 “Industria, innovación e infraestructuras”. La meta es construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. Este proyecto propuesto está alineado con el proceso tecnológico e innovación, siendo parte de la solución para los desafíos económicos y medioambientales, como es el aumento de la eficiencia energética.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Consejo de la Unión Europea. El plan de la UE para la transacción ecológica.
<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>.
- [2] Hannah Ritchie, Max Roser and Pablo Rosado (2020) - "Energy".
<https://ourworldindata.org/energy-mix>.
- [3] OCEANA. Cambio climático. <https://europe.oceana.org/es/cambio-climatico>.
- [4] Morice, C.P., J.J. Kennedy, N.A. Rayner, and P.D. Jones (2012) Quantifying uncertainties in global and regional temperatures change.
- [5] IPCC. Intergovernmental panel on climate change.
https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml#:~:text=El%20Grupo%20Intergubernamental%20de%20Expertos,repercusiones%20y%20estrategias%20de%20respuesta.
- [6] CCOO. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España (2019)
- [7] RETEMA. “Las emisiones globales de Co2 alcanzaron su nivel más alto en la historia en 2021”. <https://www.retema.es/noticia/las-emisiones-globales-de-co2-alcanzaron-a-su-nivel-mas-alto-en-la-historia-en-2021-JokCg#:~:text=Solo%20en%202021%2C%20las%20emisiones,en%20la%20energ%C3%ADa%20del%20carb%C3%B3n>.
- [8] Elcacho, J. “Causa del cambio climático”. La Vanguardia, marzo 2022.
<https://www.lavanguardia.com/natural/20220310/8113390/emisiones-mundiales-co2-marcaron-2021-nuevo-record-historico.html>.
- [9] <<DOUE>> núm.350, de 4 de octubre de 2021. Unión Europea. DOUE-L-2021_81334
- [10] IEA. World energy investment 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2022>.
- [11] DeAngelo, J., Azevedo, I., Bistline, J. et al. Energy systems in scenarios at net-zero CO2 emissions. Nat Commun 12, 6096 (2021) . <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26356-y>.
- [12] IRENA. Renewable energy and jobs – Annual Review 2021. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, October 2021

- [13] IEA. Renewables 2021: Analysis and forecast to 2026. www.iea.org.
- [14] Marcacci, S. “Renewable energy prices hit record lows”. FORBES, Enero 2021.
- [15] DATOSMACRO. Precios de los derivados del petróleo.
<https://datosmacro.expansion.com/energia/precios-gasolina-diesel-calefaccion>.
- [16] Segovia, C. “La UE paga 800 millones diarios a Rusia por su energía e intensifica la compra de gas”. EL MUNDO, marzo de 2022.
- [17] AEE. Estudio Macroeconómico del impacto del sector eólico en España. 2020. Informe elaborado por Deloitte.
- [18] FuturENERGY. “La eólica marina está llamada a convertirse en una industria de 1B\$”. Febrero 2020.
- [19] ALTERTEC. Noticia: “La eólica marina alcanza los 34137 MW de potencia instalada”. Septiembre 2021. <https://www.altertec.net/la-eolica-marina-alcanza-los-34-137-mw-de-potencia-instalada/>.
- [20] Rajgor, G. “WFO: China drives record growth years for offshore wind”. WINDPOWER monthly, Febrero 2022. <https://www.windpowermonthly.com/article/1740926/wfo-china-drives-record-growth-year-offshore-wind>.
- [21] GOV.UK. “Energy Trends: UK renewables”. Junio 2022.
<https://www.gov.uk/government/statistics/energy-trends-section-6-renewables->
- [22] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. “Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar en España”. Diciembre de 2021.
- [23] GE Renewable. <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind>.
- [24] Negro, V., López-Gutiérrez, J., Esteban, M.D., Alberdi, P., Imaz, M., Serraclara, J. “Monopiles in offshore wind: Preliminary estimate of main dimensions”. Universidad Politécnica de Madrid.
- [25] Esteban, M.D.; López-Gutiérrez, J.-S.; Negro, V. Gravity-based foundations in the offshore sector. J. Mar. Sci. Eng. 2019, 7, 64.
- [26] Iberdrola. “Cómo funciona la energía eólica marina flotante”.
[https://www.iberdrola.com/innovacion/eolica-marina-flotante#:~:text=Una%20plataforma%20flotante%20\(Floating%20Offshore,le%20proporciona%20flotabilidad%20y%20estabilidad](https://www.iberdrola.com/innovacion/eolica-marina-flotante#:~:text=Una%20plataforma%20flotante%20(Floating%20Offshore,le%20proporciona%20flotabilidad%20y%20estabilidad).
- [27] Alicia Lavín et al. (2012). «Estrategia marina. Demarcación marina Noratlántica. Parte I. Marco general evaluación inicial y buen estado ambiental.»
- [28] Naciones Unidas. “Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar”

- [29] IDEA. “Análisis del recurso: atlas eólico de España”. Estudio Técnico PER 2011-2020. Madrid, 2011.
- [30] IRENA. Renewable power generation costs in 2018, Technical Report. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2019.
- [31] Stehly TJ, Beiter PC, Heimiller DM, Scott GN. 2017 Cost of wind energy review. Technical Report, NREL/TP-6A20-72167. Denver, CO, USA: NREL; 2018.
- [32] C. P Butterfield, National Renewable Energy Laboratory (US), and Massachusetts Institute of Technology. *Engineering challenges for floating offshore wind turbines*. National Renewable Energy Laboratory, 2007.
- [33] J. Jonkman and D. Matha. A Quantitative Comparison of the Responses of Three Floating Platforms. NREL, October 2009.
- [34] J. M Jonkman and National Renewable Energy Laboratory (US). *Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine*. National Renewable Energy Laboratory, 2007.
- [35] P. D. Sclavounos, S. Lee, J. DiPietro, G. Potenza, P. Caramuscio, and G. De Michele. Floating offshore wind turbines: Tension leg platform and taugted leg buoy concepts supporting 3-5 MW wind turbines. 2010.
- [36] BlueH.EngineeringBV, historical development.2020.08-01.
<http://www.blueengineering.com/transportation---installation.html>.
- [37] Wybro PG, Wu S, Treu JJ, Chaplin DE. Method of installation of a tension leg platform and tendons therefor. US Patent 2008;7(452):162.
- [38] Castro-Santos, L. “Influence of size on the Economic Feasibility of Floating Offshore Wind Farms”. Noviembre del 2018.
- [39] The Wind Power. https://www.thewindpower.net/turbine_es_1558_siemens-gamesa_sg-8.0-167-dd.php.
- [40] The economics of wind energy by European Wind Energy Association. 2009
- [41] N. Bocard, «Capacity factor of wind power realized values vs. estimates,» ELSEVIER, Vols. %1 de %2Departament d’Economia, Universitat de Girona, Girona, Spain, nº 37, p. 2679–2688, 2009.
- [42] Gonzalez-Rodriguez, A. G. (2017). Review of offshore wind farm cost components. Energy for Sustainable Development.
- [43] Joergen Krogstad. Email communication: Steel mass of TLP, March 2011.

- [44] STATISTA. Precios del acero. <https://es.statista.com/estadisticas/634390/precios-del-acero-por-mercado-principal/#:~:text=El%20precio%20de%20referencia%20del,por%20tonelada%20m%C3%A9trica%20en%202020>.
- [45] Generador de precios.
http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cimentaciones/Hormigones_ace ros_y_encofrados/Hormigones/Hormigon_en_masa.html#gsc.tab=0.
- [46] Wind Energy, The facts. “Operations and maintenance costs of wind generated power”. <https://www.wind-energy-the-facts.org/operation-and-maintenance-costs-of-wind-generated-power.html>.
- [47] Offshore Wind. Innovation hub.
<https://offshorewindinnovationhub.com/category/operations-maintenance/>.
- [48] Renewables Consulting Group. “Counting costs”. London. renewablescg.com.
- [49] EWEA, The Economics of Wind Energy, A report by the European Wind Energy Association, 2010.
- [50] Smart, Eman & Hill. Offshore transmission benchmarking and cost monitoring (Junio 2016)
- [51] Couñago Lorenzo, B. “Estudio técnico-financiero sobre la construcción de un parque eólico marino”.
- [52] Iberly: “Tablas de coeficientes e amortización del impuesto sobre sociedades”.
<https://www.iberley.es/temas/tablas-amortizacion-i-sociedades-30681>.