



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO
EVALUCIÓN TÉCNICO/ECONÓMICA DE UN PARQUE EÓLICO
OFFSHORE EN FORMENTERA

Autor: Manuel Agüí Tejedor
Director: Ignacio Martín Gutiérrez

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Evaluación Técnico/económica de un parque eólico offshore en
Formentera

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/2024 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.: Manuel Agüí Tejedor Fecha: 14/ julio/ 2024



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

2024.07.14



20:55:49

+10'00'

Fdo.: Ignacio Martín Gutiérrez Fecha://



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO
EVALUACIÓN TÉCNICO/ECONÓMICA DE UN PARQUE EÓLICO
OFFSHORE EN FORMENTERA

Autor: Manuel Agüí Tejedor

Director: Ignacio Martín Gutiérrez

Madrid

Agradecimientos

EVALUACIÓN TÉCNICO/ECONÓMICA DE UN PARQUE EÓLICO OFFSHORE EN FORMENTERA

Autor: Agüí Tejedor, Manuel.

Director: Martín Gutiérrez, Ignacio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El imparable consumo de energía eléctrica ligado a la incipiente concienciación del cuidado del medioambiente obligan a buscar, explorar y desarrollar métodos de obtención de energía que permitan el suministro de energía sin impactar de manera notable en la naturaleza.

Palabras clave: Energía, offshore, marino

1. Introducción

Los parques eólicos marinos nacen con el propósito de aprovechar la energía de los mares. Cuentan con importantes ventajas como son su menor impacto visual y acústico y su mayor aprovechamiento de corrientes de aire debido a la carencia de obstáculos física (Corporativo, s.f.). Aunque a la vez presentan una serie de desafíos como es el transporte marítimo debido a las grandes dimensiones de las piezas a ensamblar requieran para ello barcos específicos. Otro aspecto a tener en cuenta es la coordinación de un equipo cualificado para trabajar en el mar donde la seguridad toma más aún si cabe una relevancia mayor. Y por último es fundamental preservar el ecosistema marino tanto en su construcción como durante su posterior funcionamiento. Estos parques eólicos marino se suelen emplazar a unos 70Km en zonas de poca profundidad, es decir, de entre 30 y 60 m de calado. Estas instalaciones son una buena solución para lograr energía limpia en zonas como islas donde la extensión de terreno es poca y el consumo puede ser muy elevado.

(Energía, 2021) Las islas presentan grandes desafíos en cuanto a su abastecimiento energético debido a ser territorios pequeños y aislados lo que les hace depender en gran parte de las exportaciones y utilizar el combustible fósil para obtener energía a un alto precio. Este es el problema con el que se encuentra el archipiélago balear en España: poco espacio disponible para instalaciones y gran consumo especialmente en épocas veraniegas. En concreto en este trabajo se va a abordar el suministro eléctrico de la isla de Formentera. Una isla pequeña de $83,24 \text{ km}^2$ (Wikipedia, 2024) que cuenta con el desafío de cubrir la demanda eléctrica sin comprometer la conservación de las áreas naturales de la isla. Se buscará una solución para dotar a la isla de mayor capacidad de generación eléctrica de forma limpia puesto que actualmente depende en gran medida del enlace Ibiza-Formentera, como muestra el siguiente gráfico Figura 1:

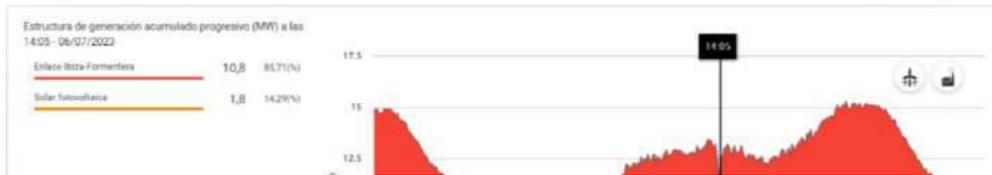


Figura 1. Demanda y generación eléctrica del día 6 de julio de 2023 en Formentera



2. Definición del Proyecto

La finalidad de este proyecto como su propio título adelanta es valorar en todos los ámbitos la instalación de un parque eólico offshore en las costas de Formentera. Para aterrizar antes de estudiar propiamente la viabilidad del proyecto se elabora un breve, pero relevante estudio de la situación actual de la energía eólica marina offshore, tratando las tecnologías actuales disponibles y algunos ejemplos de aplicación tanto a nivel nacional como internacional.

Una vez conocida en profundidad la tecnología disponible se procede a diseñar una planta eólica para lo que elegirá ubicación, potencia, conexionado a la red, tipo de aerogeneradores y se estudiará su rendimiento. A parte de la viabilidad técnica se lleva a cabo un análisis multidisciplinario atendiendo tanto a criterios económicos como medioambientales y sociales.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

En este proyecto se hace un estudio sobre la viabilidad técnica y económica del parque eólico offshore. Para la parte técnica se estudian las condiciones del suelo, mediante la batimetría, el potencial del viento, la compatibilidad con otras actividades, el oleaje y condiciones ambientales. Tras estudiar la situación se eligen los mejores equipos para obtener el mejor rendimiento, desde los aerogeneradores, plataformas, anclaje y cableado. Además, se hace un estudio sobre la mejor orientación y el dimensionamiento de este. Y se hace una exposición del estado de la técnica actual y el marco legal.

En la parte técnica se hace un estudio de los costes e ingresos y la amortización de la inversión inicial a lo largo de los treinta años de vida útil.

Estado del arte
Marco legal
Estudio de la ubicación
Diseño del parque
Dimensionamiento y orientación del parque
Análisis económico

Figura 2. Pasos seguidos en el trabajo (elaboración propia).

4. Resultados

Del proyecto del parque eólico offshore en Formentera se obtienen dos tipos de resultados, por una parte, el resultado técnico, que trata la viabilidad técnica del proyecto, recogido en Tabla 1 y Figura 3, que ofrece las características del parque y por otro lado, los resultados monetarios que ofrecen y tratan la viabilidad económica (Tabla 2).

En esta tabla (Tabla 1) se recogen todas las características del parque eólico offshore propuesto para la zona de Formentera:

Ubicación	Sur de Formentera (Figura 3)
Potencia	45 MW
Orientación	Suroeste
Nº de aerogeneradores	3
Modelo de aerogeneradores	Vestas V236-15.0 MW
Distancia entre aerogeneradores	4*diámetros = 944 m
Plataforma flotante	semi-sumergible
Amarre	semi-tensado
Anclaje	SEPLA
Cable	<i>Nexans XLPE HVAC</i>
Longitud de conexionado	4,44 km
Coefficiente de carga	14%

Tabla 1. Resumen del diseño final de la planta eólica offshore (elaboración propia).

Además, se adjunta una imagen con el esquema de los aerogeneradores ubicados en las costas de Formentera:



Figura 3. Disposición del parque eólico offshore (elaboración propia).

A nivel económico se hace un estudio de costes e ingresos recogidos en la siguiente, Tabla 2:

Proceso	€
Estudios previos	425.000
Equipos	56.879.000
Transporte	1.254.000
Instalación	16.760.000
Total costes inversión	75.318.000
Costes O&M	2.180.000
Ingresos	5.580.000
VAN	-43.266.490,81

Tabla 2. Resumen de resultados del proyecto (elaboración propia).

5. Conclusiones

La evaluación del parque eólico offshore en Formentera expone la viabilidad a nivel técnico y ambiental, siendo una gran solución ante el desafío de generar energía de forma limpia. Sin embargo, la viabilidad económica se representa como obstáculo considerable, ya que como arrojan los resultados no es sostenible y por tanto no sería una opción que se pudiese desarrollar día de hoy con los costes que actualmente conlleva la construcción de uno de estos parques.

Este tipo de estudios permiten dimensionar y poner datos a la problemática a la que se enfrenta la sociedad y empresas cuando se pretende una transición ecológica hacia fuentes de energía más limpias.

6. Referencias

- appa renovables. (10 de junio de 2024). *appa renovables*. Obtenido de <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-y-empleo/>
- Asociación Empresarial Eólica. (24 de mayo de 2024). Obtenido de AEE: <https://aeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>
- BOE. (29 de julio de 1988). *num.181 de 29/07/1988*.
- BOE. (20 de julio de 2007). *BOE-A-2007-14657*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-14657>
- BOE. (11 de diciembre de 2013). *BOE-A-2013-12913*.
- BOE. (26 de diciembre de 2013). *BOE-A-2013-13645*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-13645>
- Construction physics. (s.f.). Obtenido de <https://www.construction-physics.com/p/why-did-we-wait-so-long-for-wind-c51>
- Corporativo. (s.f.). *Iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore/construccion-parques-eolicos-marinos>
- Drilling Formulas. (s.f.). Obtenido de <https://www.drillingformulas.com/suction-anchor-calculation/>
- Ecoavant. (25 de junio de 2021). *Ecoavant*. Obtenido de https://www.ecoavant.com/contaminacion/riesgos-energia-eolica-ecosistemas-marinos_6671_102.html
- EMODnet. (s.f.). *EMODnet*. Obtenido de <https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/#!/>
- Energía, D. G. (15 de julio de 2021). *Comisión europea*. Obtenido de https://commission.europa.eu/news/focus-eu-islands-and-clean-energy-transition-2021-07-15_es#El%20Abastecimiento%20Energ%C3%A9tico:%20Un%20Desaf%C3%ADo%20Y%20Una%20Oportunidad
- ESRU. (2 de julio de 2024). *ESRU*. Obtenido de Tipos de amarre: https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/11-12/MORE/mooring/types.html
- Ferrer, I. V. (5 de julio de 2020). Formentera cubrió en junio el 10,75% de la demanda eléctrica con sus placas solares. *Periódico de Ibiza y Formentera*.
- Formenteraavu*. (5 de octubre de 2021). Obtenido de <https://formenteraavui.com/2021/10/05/formentera-bonificara-50-del-ibi-los-hogares-energias-provenientes-del-sol/>
- Formentera define el camino hacia la transición energética. (5 de junio de 2020). *Diario de Ibiza*.

Formentera define el camino hacia la transición energética. (5 de junio de 2020). *Diario de Ibiza*.

Freepik. (s.f.). Obtenido de <https://www.freepik.es/fotos/seguridad>

General Electric. (s.f.). *General Electric*. Obtenido de <https://www.governova.com/wind-power/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>

Geotermia online. (14 de febrero de 2015). *Geotermiaonline.com*. Obtenido de <https://geotermiaonline.com/4395/energias-renovables/>

Gobierno de España. (s.f.). *Red natura 2000*. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/rednatura2000_descargas.html

Gobierno de las Islas baleares. (s.f.). *Caib*. Obtenido de Plano y zonificación : <https://www.caib.es/sites/reservesmarines/f/318068>

Gobierno de las Islas Baleares. (s.f.). *Caib*. Obtenido de Las reservas marinas en las Islas Baleares: https://www.caib.es/sites/reservesmarines/es/las_reservas_marinas_en_las_illes_balears-850/

Google. (17 de mayo de 2024). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.es/maps>

Iberdrola. (6 de junio de 2024). *iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore/construccion-parques-eolicos-marinos>

Iberdrola. (28 de mayo de 2024). *Iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore>

Iberdrola. (s.f.). *Cimentaciones de aerogeneradores*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/cimentaciones-aerogeneradores-marinos>

Iberdrola. (s.f.). *Eólica marina flotante*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/innovacion/eolica-marina-flotante>

Iberdrola. (s.f.). *Iberdrola*. Obtenido de ¿Cómo se sustentan los aerogeneradores en el mar?: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/cimentaciones-aerogeneradores-marinos>

JJADMIN. (29 de noviembre de 2020). *System Network*. Obtenido de Qué es un aerogenerador y cómo funciona: <https://grupo-system.com/que-es-un-aerogenerador-y-como-funciona/>

Mapa eólico ibérico. (29 de junio de 2024). *Mapa eólico ibérico*. Obtenido de <https://www.mapaeolicoiberico.com/map;latitude=40.91057;longitude=-1.43808;altura=100;dato=micro>

Marine traffic. (s.f.). Obtenido de <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:-6.6/centery:41.4/zoom:7>

MDPI. (4 de abril de 2021). *MDPI*. Obtenido de Estructuras de soporte de hormigón para turbinas eólicas marinas: estado actual, desafíos y tendencias futuras: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/1995>

Naciones Unidas . (2015). *ODS*. Obtenido de <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>

Naciones Unidas. (23 de junio de 2024). *Naciones Unidas*. Obtenido de <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>

Nautic expo. (s.f.). Obtenido de <https://www.nauticexpo.es/prod/vryhof/product-68605-504988.html>

Nexans. (2 de julio de 2024). *Nexans*. Obtenido de <https://www.nexans.es/es/>

Nordex. (s.f.). *Nordex*. Obtenido de <https://www.nordex-online.com/es/product/n149-5-x/>

NS Energy. (3 de febrero de 2020). Parques eólicos de Dogger Bank. *NS Energy*.

Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). (2023). *Resumen del año 2022: Recursos potenciales y demanda de energía renovables mundial impulsados por el clima*. Ginebra: OMM.

Puertos del Estado. (1 de julio de 2024). *Puertos del Estado*. Obtenido de <https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>

REE. (2024). *Informe resumen de energías renovables 2023*. REE.

REE. (27 de mayo de 2024). *Red eléctrica*. Obtenido de <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-de-energias-renovables/viento/potencia-instalada-viento>

REE. (julio de 2024). *REE a tiempo real*. Obtenido de <https://demanda.ree.es/visiona/baleares/formentera5m/total>

REE. (3 de marzo de 2024). *Sistema eléctrico*. Obtenido de <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-de-energias-renovables/viento/potencia-instalada-viento>

Research Gate. (2 de julio de 2024). *Research Gate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Some-catenary-configurations-assumed-by-the-risers_fig1_242516491

ResearchGate. (s.f.). Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Monopole-foundation-consisting-of-a-driven-pile-3_fig1_283244201

Roberto Turconi, A. B. (2013). *Evaluación del ciclo de vida (LCA) de las tecnologías de generación de electricidad: descripción general, comparabilidad y limitaciones*.

Roca, J. A. (26 de diciembre de 2018). Cómo la eólica marina hace frente a profundidades de 60 metros o más. *El periódico de la energía*.

Siemens Gamesa. (s.f.). *Siemens Gamesa*. Obtenido de <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-222-dd>

Vector renewables. (1 de febrero de 2023). Obtenido de <https://www.vectorenrenewables.com/es/blog/sabes-lo-que-es-el-efecto-estela-en-un-parque-eolico>

Vestas. (1 de julio de 2024). *Vestas*. Obtenido de <https://www.vestas.com/en/energy-solutions/offshore-wind-turbines/V236-15MW>

Vestas. (2024). *Vestas*. Obtenido de <https://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/OffshoreProductBrochure/v236-150-mw-brochure/?page=6>

Viento 10. (16 de octubre de 2018). *Hotel viento 10*. Obtenido de <https://hotelviento10.es/es/vari0s/rosa-de-los-vientos>

Webinar Deployment of the off shore wind renewable energy. (9 de mayo de 2021). *UTN.BA*. Obtenido de <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/parque-eolico-marino-kriegers-flak-de-dinamarca/>

Wikipedia. (s.f.).

Wikipedia. (2024 de enero de 2024). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Formentera>

TECHNICAL/ECONOMICAL EVALUATION OF AN OFFSHORE WIND FARM IN FORMENTERA

Author: Agüí Tejedor, Manuel.

Supervisor: Martín Gutiérrez, Ignacio.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The unstoppable consumption of electrical energy linked to the incipient awareness of the care of the environment obliges to search, explore and develop methods of obtaining energy that allow the supply of energy without notably impacting on nature.

Keywords: Energy, offshore, marine

1. Introduction

Offshore wind farms are born with the purpose of harnessing the energy of the sea. They have important advantages such as lower visual and acoustic impact and greater use of air currents due to the lack of physical obstacles (Corporativo, s.f.). Although at the same time they present a series of challenges such as maritime transportation due to the large dimensions of the pieces to be assembled, requiring specific ships. Another aspect to take into account is the coordination of a qualified team to work at sea, where safety is even more important. And finally, it is essential to preserve the marine ecosystem both in its construction and during its subsequent operation. These offshore wind farms are usually located about 70 km away in shallow areas, i.e. between 30

and 60 m depth. These facilities are a good solution to achieve clean energy in areas such as islands where the land area is small and consumption can be very high.

(Energía, 2021)) The islands present great challenges in terms of energy supply because they are small and isolated territories, which makes them depend largely on exports and use fossil fuels to obtain energy at a high price. This is the problem faced by the Balearic archipelago in Spain: little space available for installations and high consumption especially in summer. Specifically, this work will address the electricity supply of the island of Formentera. A small island of 83.24 km^2 (Wikipedia, 2024) that has the challenge of covering the electricity demand without compromising the conservation of the natural areas of the island. A solution will be sought to provide the island with more electricity generation capacity in a clean way since it currently relies heavily on the Ibiza-Formentera link, as shown in the following graph Figura 4:

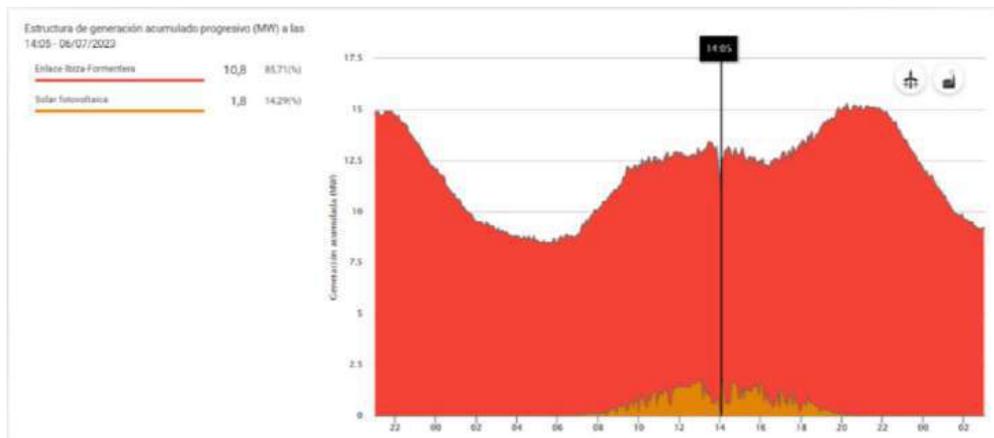


Figura 4. Electricity demand and generation on July 6, 2023 in Formentera.

2. Project definition

The purpose of this project, as its title suggests, is to assess in all areas the installation of an offshore wind farm off the coast of Formentera. To land before studying the feasibility of the project itself, a brief but relevant study of the current situation of offshore offshore wind energy is elaborated, dealing with the current technologies available and some examples of application both nationally and internationally.

Once the available technology is known in depth, we proceed to design a wind plant, choosing location, power, connection to the grid, type of wind turbines and studying their performance. Apart from the technical feasibility, a multidisciplinary analysis is carried out taking into account economic, environmental and social criteria.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

This project studies the technical and economic feasibility of an offshore wind farm. For the technical part, the study includes soil conditions through bathymetry, wind potential, compatibility with other activities, wave conditions, and environmental factors. Based on these studies, the best equipment is selected to achieve optimal performance, including wind turbines, platforms, anchoring, and cabling. Additionally, the best orientation and sizing of the wind farm are analyzed, and an exposition of the current state of technology and legal framework is provided.

In the economic part, a study is conducted on costs, revenues, and the amortization of the initial investment over the thirty-year lifespan.

State of the art
Legal framework
Location study
Park design
Sizing and orientation of the park
Economic Analysis

Figura 5. Steps followed in the project (own elaboration)

4. Results

From the offshore wind farm project in Formentera, two types of results are obtained: technical results, which address the technical feasibility of the project, as presented in Tabla 3 and Figure 3, and monetary results, which address the economic feasibility (Table 2).

In Table 1, all the characteristics of the proposed offshore wind farm for the Formentera area are detailed:

Location	South of Formentera (Figura 6)
Power	45 MW
Orientation	Southwest
N° wind turbine	3
Wind turbine model	Vestas V236-15.0 MW
Distnce between wind turbines	4*diameters = 944 m
Floating plataform	semi-sumersible
Mooring	semi-tensioned
Anchoring	SEPLA
Cable	<i>Nexans XLPE HVAC</i>
Connection length	4,44 km
Capacity factor	14%

Tabla 3. Summary of the final design of the offshore wind farm (own elaboration).

Additionally, an image showing the layout of the wind turbines off the coast of Formentera is included:

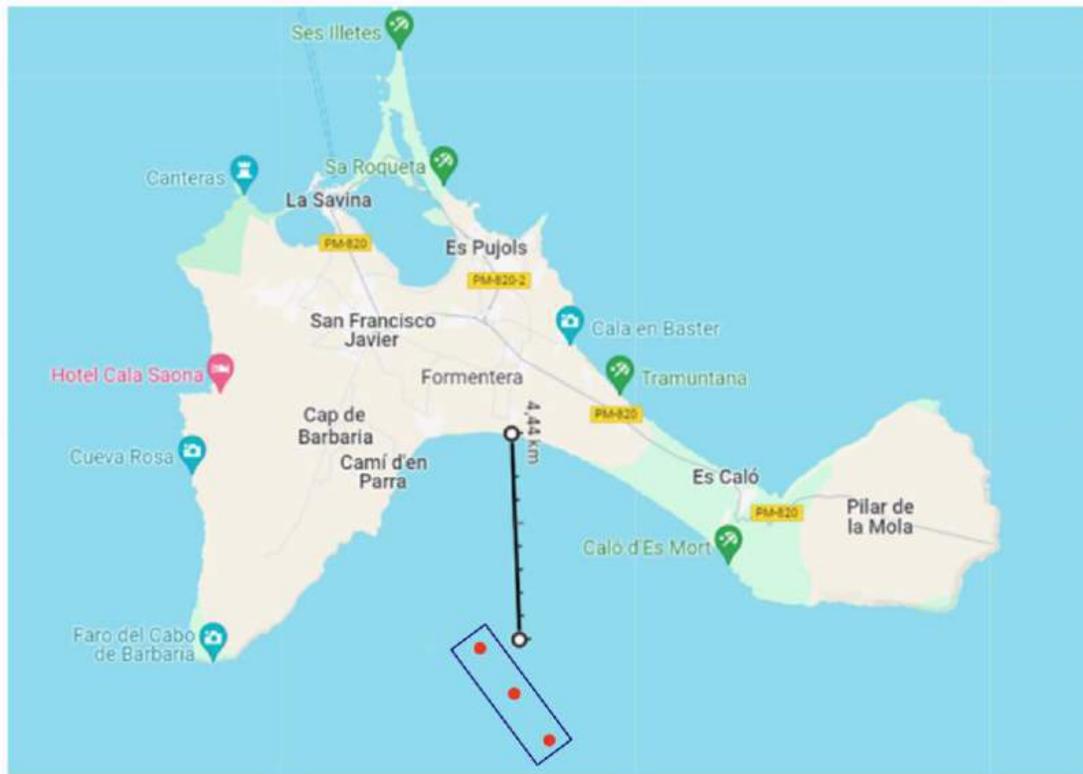


Figura 6. Layout of the offshore wind farm (own elaboration).

An economic study of costs and revenues is summarized as follows:

Process	€
Preliminary studies	425000
Equipment	56879000
Transport	1254000
Installation	16760000
Total investment costs	75.318.000
O&M costs	2180000
Revenues	5580000
VAN	-43.266.490,81

Tabla 4. Summary of project results (own elaboration)

5. Conclusions

The evaluation of the offshore wind farm in Formentera demonstrates technical and environmental viability, presenting a great solution to the challenge of generating clean energy. However, economic viability poses a significant obstacle, as the results show it is not sustainable with current construction costs for such parks.

This type of study allows society and companies to quantify and understand the challenges faced in the ecological transition towards cleaner energy sources.

6. References

- appa renovables. (10 de junio de 2024). *appa renovables*. Obtenido de <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-y-empleo/>
- Asociación Empresarial Eólica. (24 de mayo de 2024). Obtenido de AEE: <https://aeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>
- BOE. (29 de julio de 1988). *num.181 de 29/07/1988*.
- BOE. (20 de julio de 2007). *BOE-A-2007-14657*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-14657>
- BOE. (11 de diciembre de 2013). *BOE-A-2013-12913*.
- BOE. (26 de diciembre de 2013). *BOE-A-2013-13645*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-13645>
- Construction physics. (s.f.). Obtenido de <https://www.construction-physics.com/p/why-did-we-wait-so-long-for-wind-c51>
- Corporativo. (s.f.). *Iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore/construccion-parques-eolicos-marinos>
- Drilling Formulas. (s.f.). Obtenido de <https://www.drillingformulas.com/suction-anchor-calculation/>
- Ecoavant. (25 de junio de 2021). *Ecoavant*. Obtenido de https://www.ecoavant.com/contaminacion/riesgos-energia-eolica-ecosistemas-marinos_6671_102.html
- EMODnet. (s.f.). *EMODnet*. Obtenido de <https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/#/>
- Energía, D. G. (15 de julio de 2021). *Comisión europea*. Obtenido de https://commission.europa.eu/news/focus-eu-islands-and-clean-energy-transition-2021-07-15_es#El%20Abastecimiento%20Energ%C3%A9tico:%20Un%20Desaf%C3%ADo%20Y%20Una%20Oportunidad
- ESRU. (2 de julio de 2024). *ESRU*. Obtenido de Tipos de amarre: https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/11-12/MORE/mooring/types.html
- Ferrer, I. V. (5 de julio de 2020). Formentera cubrió en junio el 10,75% de la demanda eléctrica con sus placas solares. *Periódico de Ibiza y Formentera*.

Formenteraavu. (5 de octubre de 2021). Obtenido de <https://formenteraavu.com/2021/10/05/formentera-bonificara-50-del-ibi-los-hogares-energias-provenientes-del-sol/>

Formentera define el camino hacia la transición energética. (5 de junio de 2020). *Diario de Ibiza*.

Formentera define el camino hacia la transición energética. (5 de junio de 2020). *Diario de Ibiza*.

Freepik. (s.f.). Obtenido de <https://www.freepik.es/fotos/seguridad>

General Electric. (s.f.). *General Electric*. Obtenido de <https://www.governova.com/wind-power/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>

Geotermia online. (14 de febrero de 2015). *Geotermiaonline.com*. Obtenido de <https://geotermiaonline.com/4395/energias-renovables/>

Gobierno de España. (s.f.). *Red natura 2000*. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/rednatura2000_descargas.html

Gobierno de las Islas baleares. (s.f.). *Caib*. Obtenido de Plano y zonificación : <https://www.caib.es/sites/reservesmarines/f/318068>

Gobierno de las Islas Baleares. (s.f.). *Caib*. Obtenido de Las reservas marinas en las Islas Baleares: https://www.caib.es/sites/reservesmarines/es/las_reservas_marinas_en_las_illes_balears-850/

Google. (17 de mayo de 2024). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.es/maps>

Iberdrola. (6 de junio de 2024). *iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore/construccion-parques-eolicos-marinos>

Iberdrola. (28 de mayo de 2024). *Iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore>

Iberdrola. (s.f.). *Cimentaciones de aerogeneradores*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/cimentaciones-aerogeneradores-marinos>

Iberdrola. (s.f.). *Eólica marina flotante*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/innovacion/eolica-marina-flotante>

Iberdrola. (s.f.). *Iberdrola*. Obtenido de ¿Cómo se sustentan los aerogeneradores en el mar?: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/cimentaciones-aerogeneradores-marinos>

JJADMIN. (29 de noviembre de 2020). *System Network*. Obtenido de Qué es un aerogenerador y cómo funciona: <https://grupo-system.com/que-es-un-aerogenerador-y-como-funciona/>

Mapa eólico ibérico. (29 de junio de 2024). *Mapa eólico ibérico*. Obtenido de <https://www.mapaeolicoiberico.com/map;latitude=40.91057;longitude=-1.43808;altura=100;dato=micro>

Marine traffic. (s.f.). Obtenido de <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:-6.6/centery:41.4/zoom:7>

MDPI. (4 de abril de 2021). *MDPI*. Obtenido de Estructuras de soporte de hormigón para turbinas eólicas marinas: estado actual, desafíos y tendencias futuras: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/1995>

Naciones Unidas . (2015). *ODS*. Obtenido de <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>

Naciones Unidas. (23 de junio de 2024). *Naciones Unidas*. Obtenido de <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>

Nautic expo. (s.f.). Obtenido de <https://www.nauticexpo.es/prod/vryhof/product-68605-504988.html>

Nexans. (2 de julio de 2024). *Nexans*. Obtenido de <https://www.nexans.es/es/>

Nordex. (s.f.). *Nordex*. Obtenido de <https://www.nordex-online.com/es/product/n149-5-x/>

NS Energy. (3 de febrero de 2020). Parques eólicos de Dogger Bank. *NS Energy*.

Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). (2023). *Resumen del año 2022: Recursos potenciales y demanda de energía renovables mundial impulsados por el clima*. Ginebra: OMM.

Puertos del Estado. (1 de julio de 2024). *Puertos del Estado*. Obtenido de <https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>

REE. (2024). *Informe resumen de energías renovables 2023*. REE.

REE. (27 de mayo de 2024). *Red eléctrica*. Obtenido de <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-de-energias-renovables/viento/potencia-instalada-viento>

REE. (julio de 2024). *REE a tiempo real*. Obtenido de <https://demanda.ree.es/visiona/baleares/formentera5m/total>

REE. (3 de marzo de 2024). *Sistema eléctrico*. Obtenido de <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-de-energias-renovables/viento/potencia-instalada-viento>

Research Gate. (2 de julio de 2024). *Research Gate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Some-catenary-configurations-assumed-by-the-risers_fig1_242516491

ResearchGate. (s.f.). Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Monopole-foundation-consisting-of-a-driven-pile-3_fig1_283244201

Roberto Turconi, A. B. (2013). *Evaluación del ciclo de vida (LCA) de las tecnologías de generación de electricidad: descripción general, comparabilidad y limitaciones*.

Roca, J. A. (26 de diciembre de 2018). Cómo la eólica marina hace frente a profundidades de 60 metros o más. *El periódico de la energía*.

Siemens Gamesa. (s.f.). *Siemens Gamesa*. Obtenido de <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-222-dd>

Vector renewables. (1 de febrero de 2023). Obtenido de <https://www.vectorenrenewables.com/es/blog/sabes-lo-que-es-el-efecto-estela-en-un-parque-eolico>

Vestas. (1 de julio de 2024). *Vestas*. Obtenido de <https://www.vestas.com/en/energy-solutions/offshore-wind-turbines/V236-15MW>

Vestas. (2024). *Vestas*. Obtenido de <https://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/OffshoreProductBrochure/v236-150-mw-brochure/?page=6>

Viento 10. (16 de octubre de 2018). *Hotel viento 10*. Obtenido de <https://hotelviento10.es/es/variros/rosa-de-los-vientos>

Webinar Deployment of the off shore wind renewable energy. (9 de mayo de 2021). *UTN.BA*. Obtenido de <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/parque-eolico-marino-kriegers-flak-de-dinamarca/>

Wikipedia. (s.f.).

Wikipedia. (2024 de enero de 2024). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Formentera>

Índice de la memoria

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	6
SITUACIÓN DE LA ISLA DE FORMENTERA	6
ENERGÍA RENOVABLE: VENTAJAS E INCONVENIENTES	8
MOTIVACIÓN DEL PROYECTO	11
OBJETIVOS PERSEGUIDOS	11
CAPÍTULO 2. ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE	12
¿POR QUÉ ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE?	12
VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA EÓLICA OFFSHORE	15
SITUACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE EN ESPAÑA Y EN EL MUNDO	16
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	20
CAPTACIÓN DE ENERGÍA	20
AEROGENERADOR	21
ESTRUCTURA FIJA	22
ESTRUCTURA FLOTANTE	27
AMARRE DE ESTRUCTURAS OFFSHORE	28
ANCLAJE DE ESTRUCTURAS OFFSHORE	29
CAPÍTULO 4. MARCO LEGAL	32
LEGALIDAD	32
PERMISOS Y LICENCIAS NECESARIAS	33
CAPÍTULO 5. CRITERIOS PARA LA LOCALIZACIÓN	35
COMPATIBILIDAD AMBIENTAL	35
COMPATIBILIDAD CON OTRAS ACTIVIDADES PROFESIONALES	38
OLEAJE	39
FONDO MARINO	40
VIENTO	41
UBICACIÓN FINAL	44
CAPÍTULO 6. DISEÑO Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL PARQUE EÓLICO OFFSHORE	46
SELECCIÓN DEL MODELO DE AEROGENERADOR	46
SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PLATAFORMA	52
SELECCIÓN DE LA FORMA DE AMARRE	53

SELECCIÓN DE LA FORMA DE ANCLAJE	53
SELECCIÓN DEL TIPO DE CABLEADO	54
CAPÍTULO 7. DISPOSICIÓN Y DIMENSIONAMIENTO	57
ORIENTACIÓN	57
EFFECTO ESTELA.....	57
DISPOSICIÓN	58
ELECCIÓN FINAL	59
CAPÍTULO 8. POTENCIA, ENERGÍA Y RENDIMIENTO DEL PARQUE	60
DATOS DEL VIENTO.....	60
CÁLCULO DE POTENCIA Y ENERGÍA	61
CURVA DE ENERGÍA EXTRAÍDA.....	64
CAPÍTULO 9. ANÁLISIS ECONÓMICO	65
COSTES DE INVERSIÓN	65
Costes de estudios previos y obtención de permisos	65
Costes de equipos.....	66
Costes de transporte	66
Costes de instalación	67
Coste total inicial de inversión	67
Costes de mantenimiento y operación	67
INGRESOS ANUALES.....	68
AMORTIZACIÓN	68
CAPÍTULO 10. ANÁLISIS SOCIAL	70
ALINEACIÓN CON LOS ODS	70
IMPACTO LOCAL	70
CAPÍTULO 11. CONCLUSIONES	72
DISEÑO FINAL	72
CONCLUSIONES	73
Referencias.....	75

Índice de figuras

Figura 1. Demanda y generación eléctrica del día 6 de julio de 2023 en Formentera	8
Figura 2. Pasos seguidos en el trabajo (elaboración propia).	9
Figura 3. Electricity demand and generation on July 6, 2023 in Formentera.	15
Figura 4. Steps followed in the project (own elaboration)	16
Figura 5. Demanda y generación eléctrica del día 6 de julio de 2023 en Formentera (REE, 2024). ...	6
Figura 6. Demanda y generación eléctrica del día 23 de enero de 2024 en Mallorca (REE, 2024). ...	7
Figura 7. Ratio potencia renovable/ potencia por C.C.A.A. (%) y potencia renovable (MW) (REE, 2024).	7
Figura 8. Estructura de generación eléctrica de España en 2022 (%) (REE, 2024).	9
Figura 9. Empleo directo e indirecto del sector de las energías renovables hasta 2018 en España (appa renovables, 2024).	10
Figura 10. Coste de las distintas tecnologías para obtener electricidad (Geotermia online, 2015). .	10
Figura 11. Evolución anual de la potencia instalada eólica en la España (REE, 2024).	12
Figura 12. Evolución anual de la potencia instalada eólica en Baleares (REE, 2024).	13
Figura 13. Parque eólico marino Kriegers Flak de Dinamarca (Webinar Deployment of the off shore wind renewable energy, 2021).	14
Figura 14. Vindeby Offshore Wind Farm.	16
Figura 15. Mapa de parques eólicos marino de Grupo Iberdrola en el mundo (Iberdrola, 2024).	17
Figura 16. Potencia instalada de eólica marina por país a principios de 2021 (Asociación Empresarial Eólica, 2024).	18
Figura 17. Partes de un aerogenerador (JJADMIN, 2020).	20
Figura 18. Construcción de un parque eólico marino (Iberdrola, 2024).	21
Figura 19. Cimentación monopilote (ResearchGate).	22
Figura 20. Comparativa entre cimentación monopilote y por gravedad (MDPI, 2021).	23
Figura 21. Cimentación trípode (Construction physics).	24
Figura 22. recreación de una cimentación tripilote (Roca, 2018).	25
Figura 23. Cimentaciones tipo <i>jacket</i> del parque eólico marino de <i>Wikinger</i> (Iberdrola, s.f.).	26
Figura 24. Comparativa de los <i>jackets</i> de <i>East Anglia ONE</i> y <i>Wikinger</i> (Iberdrola, s.f.).	26
Figura 25. Tipos de plataformas flotantes para aerogeneradores (Iberdrola, s.f.).	28
Figura 26. Dos tipos de sistemas de amarre (ESRU, 2024).	29
Figura 27. Punto de anclaje de un aerogenerador marino (Freepik, s.f.).	30
Figura 28. Diagrama del anclaje de succión (Drilling Formulas).	30
Figura 29. Ancla VLA (Nautic expo, s.f.).	31
Figura 30. Mapa de la red natura 2000 (Gobierno de España, s.f.).	35
Figura 31. Plano y zonificación de Formentera-Ibiza (Gobierno de las Islas baleares, s.f.).	36
Figura 32. Recorte mapa de reservas marinas de las Islas baleares (Gobierno de las Islas baleares, s.f.).	37
Figura 33. Mapa de Formentera con un posible área de trabajo (Google, 2024).	38
Figura 34. Densidad de tráfico marítimo en los alrededores de Formentera (Marine traffic, s.f.). ...	39

Figura 35. Mapa de Formentera con las líneas de profundidad (EMODnet, s.f.).....	40
Figura 36. Mapa de Formentera con las líneas de profundidad y escala de colores (EMODnet, s.f.)	41
Figura 37. Mapa de vientos medios de las islas de Ibiza y Formentera con escala (Mapa eólico ibérico, 2024)	42
Figura 38. Rosa de los vientos (Viento 10, 2018).....	43
Figura 39. Ubicación posible del parque eólico offshore.	44
Figura 40. Distancia de la posible ubicación respecto a la costa de Formentera (Google, 2024). ...	45
Figura 41. Aerogenerador <i>Siemens Gamesa SG 14-222 DD</i> (Siemens Gamesa).	47
Figura 42. Parque eólico de <i>Dogger Bank Wind Farm</i> el Mar del Norte de Reino Unido (NS Energy, 2020)	49
Figura 43. Aerogenerador <i>Nordex N149/5.X</i> (Nordex, s.f.).....	51
Figura 44. Esquema del cable <i>Nexans XLPE HVAC</i> (Nexans, 2024)	55
Figura 45. Tipos de cableado en plataformas offshore (Research Gate, 2024).	56
Figura 46. Rosa de los vientos de la ubicación seleccionada (Mapa eólico ibérico, 2024).	57
Figura 47. Efecto estela (Vector renewables, 2023).....	58
Figura 48. Disposición de los aerogeneradores (elaboración propia).	58
Figura 49. Esquema de un aerogenerador con plataforma semi-sumergible (Ecoavant, 2021).....	59
Figura 50. Ajuste de Weibull de la velocidad del viento (Mapa eólico ibérico, 2024).....	60
Figura 51. Histograma de la velocidad media del viento (m/s) en SIMAR 2101103 (Puertos del Estado, 2024).	61
Figura 52. Fórmula de cálculo de la potencia.	61
Figura 53. Curva de producción anual del aerogenerador Vestas V236-15.0 MW (Vestas, 2024).	64
Figura 54. ODS (Naciones Unidas, 2024).....	70
Figura 55. Playa de Formentera con barcos al fondo (elaboración propia).	71
Figura 49. Esquema de un aerogenerador con plataforma semi-sumergible (Ecoavant, 2021).	¡Error! Marcador no definido.

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de resultados del proyecto (elaboración propia).	10
Tabla 2. Summary of project results (own elaboration)	17
Tabla 3. Comparativa de los diez mayores parques marinos eólicos (Wikipedia).....	19
Tabla 4. Coordenadas de las reservas marinas de Formentera de la Ilustración 15.	37
Tabla 5. Datos del oleaje en Formentera (elaboración propia con datos de Windy).....	39
Tabla 6. Resumen de los tipos de vientos en Formentera (elaboración propia con datos de <i>Windy</i> y la <i>AEMET</i>).....	43
Tabla 7. Características generales del aerogenerador Siemens Gamesa SG 14-222 DD (Siemens Gamesa).	47
Tabla 8. Características generales del aerogenerador GE Haliade-X 12 MW (General Electric).	48
Tabla 9. Características generales del aerogenerador Vestas V236-15.0 MW (Vestas, 2024).	49
Tabla 10. Características generales del aerogenerador MHI Vestas V164-9.5 MW (Vestas, 2024).	50
Tabla 11. Características generales del aerogenerador Nordex N149/5.X (Nordex, s.f.).	51
Tabla 12. Resultados cálculo de energía generada anual de cada aerogenerador (elaboración propia).	51
Tabla 13. Comparativa entre los tipos de amarre (elaboración propia).	53
Tabla 14. Comparativa entre los tipos de anclaje (elaboración propia).	54
Tabla 15. Especificaciones del cable <i>Nexans XLPE HVAC</i> (Nexans, 2024).	55
Tabla 16. Resultados de potencia (MW) y energía (MWH) del aerogenerador (elaboración propia).	63
Tabla 17. Resultados de energía del parque (elaboración propia).	63
Tabla 18. Resultados de producción del aerogenerador según la curva (elaboración propia).	64
Tabla 19. Coste de trabajos previos (elaboración propia).	66
Tabla 20. Coste de los equipos (elaboración propia).	66
Tabla 21. Coste de los equipos (elaboración propia).	67
Tabla 22. Coste de los equipos (elaboración propia).	67
Tabla 23. Costes totales iniciales de inversión (elaboración propia).....	67
Tabla 24. Amortización de los cinco primeros años de vida útil del parque eólico (elaboración propia).	69

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

SITUACIÓN DE LA ISLA DE FORMENTERA

Las islas presentan grandes desafíos en cuanto a su abastecimiento energético debido a ser territorios pequeños y aislados (Energía, 2021) lo que les hace depender en gran parte de las exportaciones y utilizar el combustible fósil para obtener energía a un alto precio. Este es el problema con el que se encuentra el archipiélago balear en España: poco espacio disponible para instalaciones y gran consumo especialmente en épocas veraniegas. En concreto en este trabajo se va a abordar el suministro eléctrico de la isla de Formentera. Una isla pequeña de $83,24 \text{ km}^2$ (Wikipedia, 2024) que cuenta con el desafío de cubrir la demanda eléctrica sin comprometer la conservación de las áreas naturales de la isla. Se buscará una solución para dotar a la isla de mayor capacidad de generación eléctrica de forma limpia puesto que actualmente depende en gran medida del enlace Ibiza-Formentera, como muestra el siguiente gráfico, Figura 7:

Actualmente el archipiélago balear cuenta con una interconexión de todas las islas y con la España

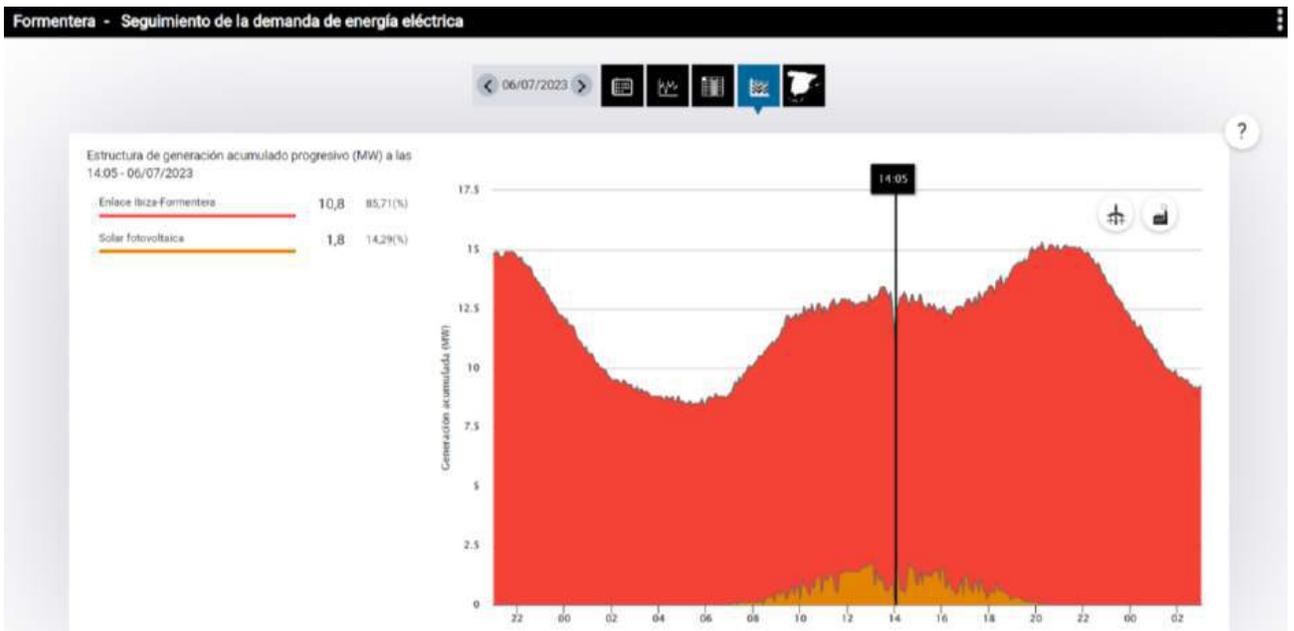


Figura 7. Demanda y generación eléctrica del día 6 de julio de 2023 en Formentera (REE, 2024).

peninsular logrando así dar mayor solidez y consistencia al conjunto ante posibles desajustes de frecuencia o tensión.

Para poder cubrir la demanda del archipiélago se utiliza el enlace peninsular y generación propia de cada isla, siendo la isla de Mallorca, la que debido a su extensión tiene más peso. Un gran porcentaje de la energía generada en esta isla es a través de ciclos combinados (Figura 8) que utiliza combustibles fósiles.

terrestre y la conexión con otras islas. Lo que obliga a buscar fuentes renovables de energía y de gran capacidad.

ENERGÍA RENOVABLE: VENTAJAS E INCONVENIENTES

El creciente aumento en el consumo de electricidad como consecuencia de la transición digital y tecnológica unido a la emergente concienciación del impacto medioambiental por fenómenos como el cambio climático o la contaminación del aire, ponen como principal actor a la energía renovable siendo la alternativa de las fuentes tradicionales de energía. Y es aquí donde nace el gran reto para la ingeniería: dotar a la sociedad de infraestructuras eléctricas que permitan un posterior desarrollo económico y tecnológico.

Se podrían diferenciar seis tipos de energía renovable según su fuente de aprovechamiento:

- **Energía Solar:** se obtiene del sol, una fuente inagotable en la escala de tiempo humano y disponible en prácticamente todo el mundo. Se puede aprovechar con placas fotovoltaicas convirtiéndola luz en electricidad o mediante sistemas térmicos.
- **Energía Eólica:** aprovecha el viento convirtiendo la energía cinética en electricidad mediante aerogeneradores. En España representa el 19,2% del mix energético general. Los parques eólicos se pueden construir en tierra o en el agua.
- **Energía Hidroeléctrica:** se obtiene del aprovechamiento del movimiento del agua en corrientes naturales como ríos o embalsada como pantanos y presas, convirtiendo la energía potencial o cinética en electricidad. Esta fuente de energía puede ocasionar impacto significativo en el ecosistema.
- **Biomasa:** se basa en el aprovechamiento de residuos urbanos, agrícolas o industriales para obtener calor, electricidad o combustibles.
- **Energía Geotérmica:** a través de orificios en el suelo se aprovecha el calor de la Tierra para obtener electricidad o calor para la calefacción.
- **Energía Mareomotriz y Undimotriz:** se obtiene del aprovechamiento del movimiento del agua del mar en forma de mareas y corrientes oceánicas u olas respectivamente.

A continuación, se muestra un gráfico (Figura 10) con el mix energético de España en 2022:



Figura 10. Estructura de generación eléctrica de España en 2022 (%) (REE, 2024).

Las energías renovables presentan importantes ventajas respecto a las fuentes de energía más tradicionales de origen fósil. La principal ventaja es la disminución de los llamados gases de efecto invernadero causantes del cambio climático. Aunque esta afirmación es cierta, cabe destacar que las energías renovables, aunque durante la generación no emitan dióxido de carbono (CO₂) ni otros gases de efecto invernadero, no quiere decir que en su construcción e instalación no los generen. De hecho, en el proceso de instalación y desmantelamiento las energías “verdes” generan mayor huella de carbono que las de origen fósil, pero si presentamos una visión global de todo el proceso incluyendo instalación, generación y desmantelamiento, el impacto es menor como así lo recoge el informe de IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Donde indica en gramos de CO₂ eq/kWh las gestión de residuos según el tipo de fuente de energía. Siendo de entre 469 y 1001 gramos de CO₂ eq/kWh en el caso de energías fósiles (gas, carbón y petróleo) frente a los 16 gramos de CO₂ eq/kWh en el caso de la eólica, entre 4 y 14 gramos de CO₂ eq/kWh de la hidráulica o los 30 u 80 gramos de CO₂ eq/kWh de la fotovoltaica. A la luz de estos datos se puede asegurar que las energías renovables son más respetuosas con el medioambiente como así lo apoya también el estudio *Evaluación del ciclo de vida (LCA) de las tecnologías de generación de electricidad: descripción general, comparabilidad y limitaciones* de Roberto Turconi, Alessio Boldrin y Thomas Astrup.

Por otra parte, la energía renovable al procede de fuentes inagotables a escala humana nos proporciona estabilidad de recursos e independencia energética pues nos permite no depender tanto de las exportaciones de recursos fósiles en el caso como España que carece de ellos a la vez que nos permite diversificar la producción con las distintas fuentes.

Por último, las energías renovables están detrás de una gran empleabilidad que va en aumento como así lo confirma el informe de Naciones Unidas *Energías renovables y empleo: revisión anual de 2022* donde se indica que en el año 2022 se crearon hasta 700.000 puestos de trabajos nuevos asociados a las energías renovables. En la siguiente gráfica Figura 11 se puede observar esa tendencia del empleo relacionado con las energías en España.

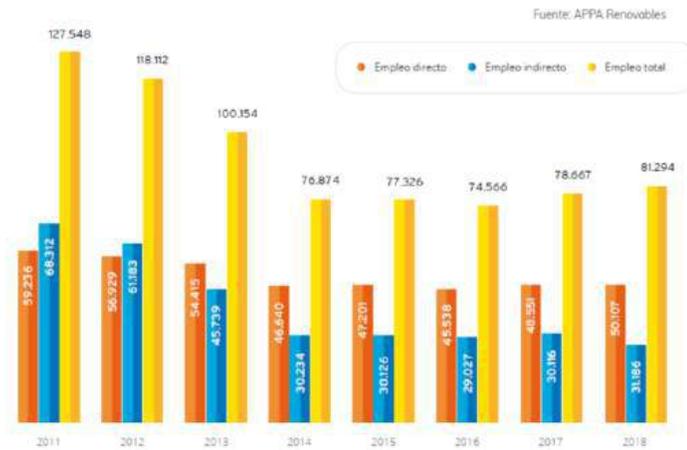


Figura 11. Empleo directo e indirecto del sector de las energías renovables hasta 2018 en España (appa renovables, 2024).

A pesar de las múltiples ventajas y factores a favor de la energía renovables, esta también presenta algunos puntos a mejorar como es intermitencia debido a que dependen de recursos naturales y esta, a veces es imprevisible e irregular. Un factor que podría ser corregido con una buena y específica planificación. Además, presentan un alto coste inicial de construcción, debido a que aún la industria no está muy avanzada en este campo y en muchos casos se trata de nuevos diseños, pero con el tiempo se podrán ir abaratando costes una vez se normalice la construcción de este tipo de instalaciones.

En el siguiente gráfico Figura 12 se puede observar la comparativa del coste entre los distintos tipos de energía.

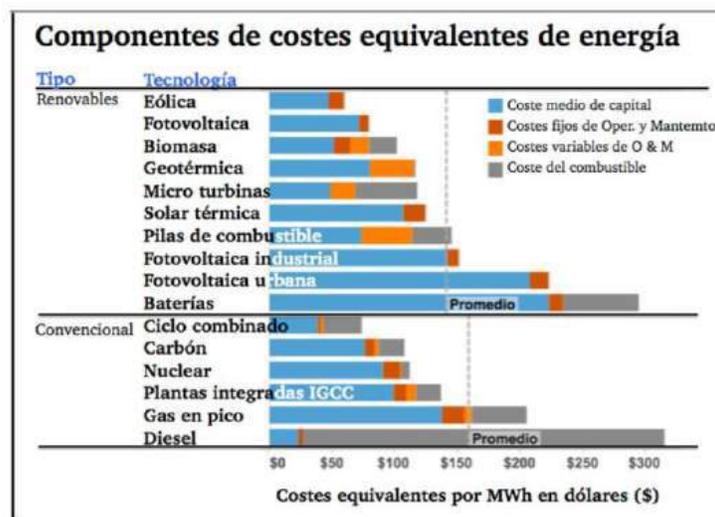


Figura 12. Coste de las distintas tecnologías para obtener electricidad (Geotermia online, 2015).

Las energías renovables, a pesar de presentar ciertos puntos débiles, las ventajas los superan con creces, convirtiéndose así en una solución idónea para aunar la generación de electricidad necesaria para cubrir la demanda actual y futura con el compromiso de generar el menor impacto posible en el medio ambiente. Siendo este el mayor reto al que enfrentarse desde todos los ámbitos tanto tecnológico, económico como político del Siglo XXI.

MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Como se describe en los párrafos anteriores la isla de Formentera presenta un gran desafío en su suministro de energía de forma respetuosa con el medioambiente. Una vez implementado el autoconsumo mediante placas fotovoltaicas y comprobar que no es suficiente, cabe plantearse una búsqueda de fuentes de energía renovable que permitan cubrir la demanda de energía con el menor impacto posible en el ecosistema.

Esta situación y la posibilidad de desarrollar formas de aprovechamiento de energía renovables es lo que motiva a realizar este trabajo en el que se propondrá y se estudiará la viabilidad de un parque eólico offshore en las costas de Formentera.

La idea de un parque eólico offshore se justifica por ser la energía eólica, la energía renovable más desarrollada en España y poder instalar en el mar sin quitar espacio en la tierra tan escasa en la isla.

Esta posible medida va encaminada en la línea marcada por las autoridades de la isla hacia la transición energética (Formentera define el camino hacia la transición energética, 2020).

OBJETIVOS PERSEGUIDOS

Este proyecto nace con la idea de hacer un análisis multidisciplinar de la propuesta de realizar un parque eólico offshore en las costas de Formentera. Para ello, no basta con hacer un mero análisis técnico, sino que se estudiarán todos los aspectos que rodean a esta solución de para proveer la isla de electricidad con perspectiva ecológica. Las evaluaciones y análisis entorno a los que va a centrarse el trabajo son técnico, económico, medioambiental y social.

En cuanto a la evaluación técnica del posible parque marino, se expondrán las diferentes tecnologías existentes actualmente con ejemplos reales a nivel nacional e internacional y su posible aplicación en nuestro caso. Además, se analizará la velocidad y dirección para elegir la mejor ubicación de entre todas las posibles y se estudiará el lecho marino sobre el que se fijaran los aerogeneradores. Por último, se estudiará la manera de conectarlo a la red y las diferentes protecciones del sistema.

La viabilidad económica del parque eólico resulta de vital importancia ya que, aunque un proyecto sea viable a nivel técnico sino es sostenible en su plano económico difícilmente va a poder ser llevado a la realidad, sino es mediante subvenciones u obras de filantropía. Este punto es el más crítico y diferencial entre un proyecto meramente académico y uno profesional. A partir de los datos económicos se van a poder extraer conclusiones útiles para lograr posibles inversores. Además, como en se ha expuesto en apartados anteriores a lo largo de toda la introducción se presta una gran importancia a la sostenibilidad ambiental y su posible impacto en el entorno. Por último,

para lograr un proyecto global, se ofrecerá una visión social en cuanto al impacto de esta propuesta para lo que usarán los ODS definidos por la ONU.

CAPÍTULO 2. ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE

¿POR QUÉ ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE?

La incesante búsqueda de la neutralidad de carbono debido a la fuerte concienciación ambiental, ha permitido e impulsado las energías renovables hasta considerarlas imprescindibles como vía de transición energética. A pesar existir varias fuentes de energías renovables como ya se ha descrito en los apartados anteriores, la energía eólica se ha posicionado como la más importante y la que mayor porcentaje representa en potencia instalada en el panorama nacional, siendo este de 24,5%, según datos de Red eléctrica española (REE, 2024), es decir, representa casi un cuarto de la energía renovable instalada en nuestro país y manteniendo una dinámica positiva como así lo muestra la siguiente figura,(Figura 13).

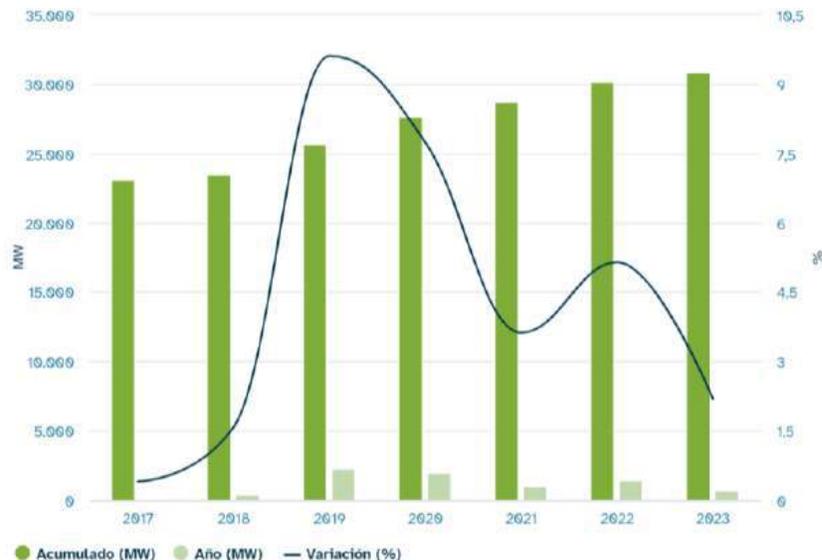


Figura 13. Evolución anual de la potencia instalada eólica en la España (REE, 2024).

En esta ilustración vemos como en los años 2019 y 2020 tuvo lugar un gran crecimiento y como en 2023 se logró tener 30000MW de potencia instalada en España. Un gran dato que permitiría avanzar en la estrategia marcada por el Ministerio para la Transición Energética y el Reto Demográfico mediante su propuesta de revisión del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) a 2030, en el que el objetivo es alcanzar la tan ansiada neutralidad en emisiones de carbono de aquí a 2050. Para ello, se vislumbra la idea de aumentar el peso de energías renovables

hasta más del 48% en el consumo final de energías y generar un 81% de la electricidad con energías renovables.

Estos datos a nivel nacional contrastan con los registrados en el archipiélago balear, donde los números de energía eólica no son tan optimistas y se da una situación de estancamiento desde 2017, situando la potencia instalada en alrededor de 4MW como se puede ver en la siguiente gráfica, Figura 14.

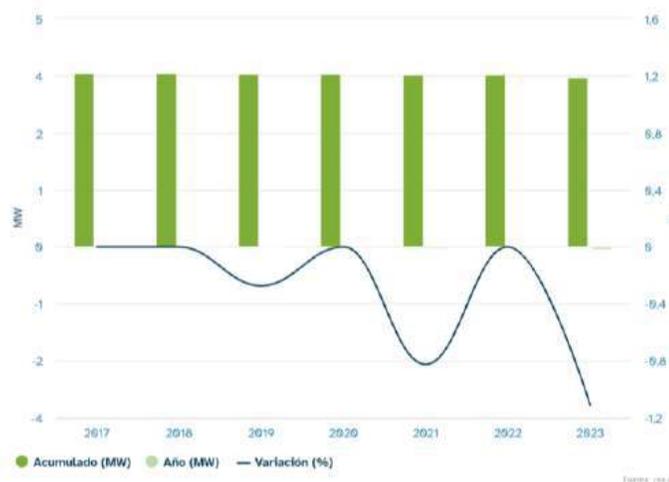


Figura 14. Evolución anual de la potencia instalada eólica en Baleares (REE, 2024).

En esta gráfica no solo se puede ver que la potencia instalada no crece, sino que decrece, lo que contrasta con la idea de la descarbonización presente en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), luego parece razonable cambiar esta dinámica y aumentar esta potencia instalada.

Como se deduce de los anteriores párrafos, en España la energía eólica tiene un peso importante y por tanto, su tecnología presenta un gran desarrollo y apostar por esta opción parece una buena idea. Por otra parte, como se ha visto en el Capítulo 1 que las islas representan ciertos problemas de espacio, debido a sus reducidas dimensiones, luego instalar parques terrestres eólicos puede ver imposible a nivel logístico. Por lo tanto, la instalación de un parque eólico marino se presenta como la mejor opción, para así aprovechar los vientos que acostumbran a ser más estables y fuertes.

Esta tecnología, aunque es similar a la eólica, presenta ciertas diferencias como su ubicación en el mar o masa de agua con una profundidad de incluso de más de 60 metros o el tamaño de sus aerogeneradores, que presentan un mayor tamaño y robustez con la idea de resistir las inclemencias de alta mar.



Figura 15. Parque eólico marino Kriegers Flak de Dinamarca (Webinar Deployment of the off shore wind renewable energy, 2021).

De manera natural y familiar cada vez que nos hablan de eólica, se nos viene a la cabeza la eólica terrestre u *onshore*, pero en los últimos años, el desarrollo de la técnica ha permitido hacer viable el mover estas instalaciones desde la tierra al mar, siendo un importante paso para los objetivos de desarrollo sostenible. Colocando los aerogeneradores en alta mar se logra obtener vientos más constantes y fuerte que en tierra, al carecer de barreras físicas. Además, puesto que en el mar el espacio no está tan tensionado, se suelen construir grandes parques para hacerlos más viables a nivel económico.

Las condiciones marinas hacen que construir un parque eólico suponga un verdadero reto para la ingeniería pues crecen las dificultades en cuanto a anclaje, transporte, diseño y mantenimiento, pero la fuerte apuesta pues la investigación, la innovación y el desarrollo han permitido superar estos obstáculos y hacer viable este tipo de tecnología.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA EÓLICA OFFSHORE

En los apartados anteriores se han ido esgrimiendo argumentos que justifican el uso de la energía eólica offshore, pero en este apartado se pretende agrupar en la dicotomía de ventajas e inconvenientes las diferentes características de esta tecnología con la necesaria comparación con la eólica terrestre.

A la ventaja compartida por la mayoría de energías renovables de ser inagotable se le une la estabilidad del recurso en alta mar donde las rachas de vientos mantienen menos turbulencias y una mayor fuerza, traduciéndose en un mayor rendimiento y una menor fatiga que alarga su vida útil. Además, esta constancia del flujo del aire hace que se pueda estar produciendo electricidad durante todo el día. Por otra parte, al ubicarse en el mar donde se dispone de mayor espacio se pueden construir parques de mayor tamaño y potencia, reduciendo el impacto acústico de las palas y visual si se aleja lo suficiente de la costa y dando la oportunidad de aprovechar este recurso en zonas como las islas donde no se pueden instalar parques eólicos terrestres y hay una gran densidad de población. Por último, se trata de una fuente de energía no contaminante, abundante y económica lo que la posiciona como una gran alternativa las fuentes de energía de origen fósil.

A pesar de sus grandes ventajas, esta tecnología presenta ciertas debilidades derivadas de su ubicación en alta mar como es su alta inversión inicial derivado de la dificultad de su diseño y su construcción. Requieren de un estudio previo que en ocasiones supone un verdadero reto para la ingeniería. Además, el transporte y la posterior instalación de las partes y materiales del parque se encarecen pues la cimentación, el cableado y los aerogeneradores requieren de mayor protección y métodos más sofisticados. Luego su mantenimiento debido a la alta corrosión derivada de entornos marinos la hacen más cara y dificultosa debido al acceso hasta estos parques. A esto se le une un mayor coste por el tema de la burocracia de las licencias y permisos ya sean locales, regionales o nacionales, lo que también afecta al coste. Por último, en el mar se debe tener especial cuidado en cuanto al fondo marino, que puede estar protegido por la diversidad biológica y los otros distintos usos navales, petrolíferos o militares.

Cabe destacar que esta tecnología presenta unas ventajas sustanciales y unas debilidades que podrían corregirse prestando atención a la ubicación de instalación y apostando por un mayor desarrollo si cabe de esta técnica tanto por parte de las administraciones públicas como por la parte privada, para lograr así una fuente de energía realmente competitiva.

SITUACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE EN ESPAÑA Y EN EL MUNDO

La energía eólica marina tuvo como primer hito la construcción del primer parque "Vindeby Offshore Wind Farm" en el año 1991 con una inversión estimada de 10 millones de dólares. En aquellos años se consideró algo ridículo, pero supuso el primer paso de lo que ahora se ha convertido en una verdadera oportunidad.

Esta instalación contaba con once aerogeneradores de 450 kW cada uno de la firma Bonus Energy, lo que daba una potencia total instalada de alrededor de 5 MW, algo insignificante. Actualmente, un solo aerogenerador ya genera cerca del doble que aquel parque, pues es muy común encontrarse en el mercado aerogeneradores de 8 MW e incluso General Electric trabaja en uno de 12 MW.



Figura 16. Vindeby Offshore Wind Farm.

La posterior fuerte y decidida apuesta a nivel mundial por los objetivos de un desarrollo sostenible colocando la generación de energía limpia como pieza clave, como así destaca el informe *Resumen del año 2022: Recursos potenciales y demanda de energía renovable mundial impulsados por el clima* de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) (Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), 2023), ha permitido el desarrollo de las tecnologías detrás del

aprovechamiento de esta energía. Y de entre todas ellas, la energía eólica marina se perfila como la gran apuesta de futuro con un camino de innovación aún por seguir desarrollando. Este desarrollo se lleva a cabo tanto a nivel nacional como internacional, dando lugar a grandes colaboraciones tanto entre países como empresas privadas que se han lanzado de lleno con el apoyo público al diseño y construcción de parques offshore. Un ejemplo de apuesta por este tipo de energía es Grupo Iberdrola contando al cierre de 2023 con 1.793 MW offshore instalados y 3.000 MW planeados antes de 2027 gracias a importantes inversiones en todo el mundo.



Figura 17. Mapa de parques eólicos marino de Grupo Iberdrola en el mundo (Iberdrola, 2024).

Actualmente, uno de los grandes referentes en instalación de eólica offshore es China que representa algo más del 48% de la potencia instalada como así lo indica el siguiente gráfico, Figura 18.

Potencia instalada de eólica marina por país a principios de 2021

Fuente: REE y elaboración AEE

PAÍS/ ZONA	CAPACIDAD INSTALADA (MW)	%
China	27.680	48,4%
Reino Unido	12.522	21,9%
Alemania	7.728	13,5%
Países Bajos	3.003	5,3%
Dinamarca	2.308	4,0%
Bélgica	2.262	4,0%
Resto de Asia	1.300	2,3%
Resto de Europa	331	0,6%
Estados Unidos	42	0,1%
TOTAL	57.176	100%

Principales países por instalaciones de eólica marina

Fuente: GWEC, WindEurope y elaboración AEE

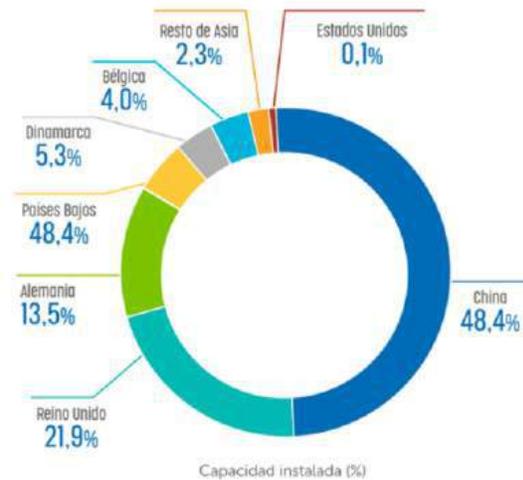


Figura 18. Potencia instalada de eólica marina por país a principios de 2021 (Asociación Empresarial Eólica, 2024).

A pesar de la dinámica de inversiones en eólica marina por parte de gobiernos y empresas que está permitiendo un gran avance de la técnica, aún queda mucho camino por recorrer, para pasar de ser un complemento de otras a convertirse en protagonista de una transición energética hacia un mundo más sostenible. Puesto que actualmente la potencia total instalada es de 57176 MW y la potencia de España es 125620MW. Esta comparación nos sirve para darnos cuenta de que no es suficiente lo que existe hasta ahora.

La intención y la voluntad de desarrollar la energía eólica offshore están presentes, sin embargo la burocracia y los trámites frenan y ralentizan el proceso, luego las instituciones competentes deberían actuar para optimizar esfuerzos como por ejemplo la Comisión Europea, que ha propuesto un nuevo reglamento con la idea de acelerar el Plan REPowerEU, ante situaciones como la invasión de Ucrania por parte de Rusia. Una postura defendida por Vestas en The Economist donde indica que las soluciones al cambio climático existen y solo hace falta un mayor impulso y libertad por parte de los gobiernos.

Para poder tener una idea global de las dimensiones y capacidad de los parques eólicos marinos del mundo en la siguiente tabla se recogen diez de los mayores parques eólicos existentes en el mundo ya estén operativos o en fase de construcción, con sus datos más importantes como es su ubicación, su capacidad el modelo y tipo de turbinas instaladas y el tipo de anclaje de estas:

Nombre	Ubicación	Potencia (MW)	Nº turbinas	Modelo de turbina	Anclaje	Estado
Hornsea 2	Reino Unido	1.386	165	Siemens Gamesa 8.4 MW	Monopile	Operativa
Hollandse Kust Zuid	Países Bajos	1.500	139	Siemens Gamesa 11 MW	Monopile	Operativa
Dogger Bank A y B	Reino Unido	2.400 (1.200 cada una)	Por determinar	GE Haliade-X 13 MW	Monopile	construcción
Walney Extension	Reino Unido	659	87	Siemens Gamesa 7 MW	Monopile	Operativa
Borssele 1 & 2	Países Bajos	752	94	Siemens Gamesa 8 MW	Monopile	Operativa
London Array	Reino Unido	63	175	Siemens Gamesa 3.6 MW	Monopile	Operativa
East Anglia ONE	Reino Unido	714	102	Siemens Gamesa 7 MW	Monopile	Operativa
Beatrice	Reino Unido	588	84	Siemens Gamesa 7 MW	Jacket	Operativa
Race Bank	Reino Unido	573	91	Siemens Gamesa 6 MW	Monopile	Operativa
Greater Gabbard	Reino Unido	504	140	Siemens Gamesa 3.6 MW	Monopile	Operativa

Tabla 5. Comparativa de los diez mayores parques marinos eólicos (Wikipedia).

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

CAPTACIÓN DE ENERGÍA

La energía eólica se basa en aprovechar la energía cinética del viento haciendo girar las palas de los aerogeneradores. Unas palas de gran tamaño que pueden girar incluso con vientos leves, que hacen girar una turbina a velocidad angular baja incrementada por un multiplicador para luego mediante un generador convertir esa energía mecánica en electricidad.

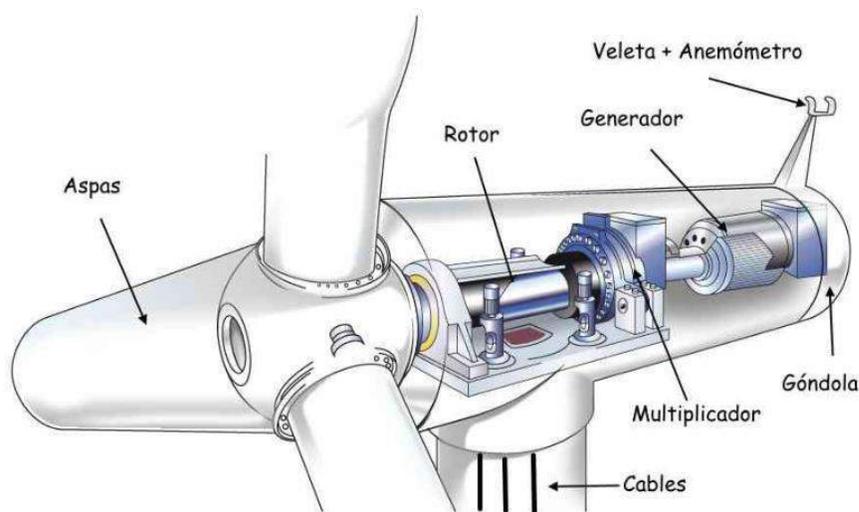


Figura 19. Partes de un aerogenerador (JJADMIN, 2020).

Este proceso de captación de energía es común tanto en la energía eólica terrestre como marina, la diferencia del proceso se presenta en la colocación de los aerogeneradores. En el caso de la *offshore*, estos se instalan en plataformas flotantes (*Floating Offshore Wind Platform - FOWP*) construidas en hormigón, acero o híbridas. Las estructuras flotantes se estabilizan mediante los fondeos y anclas. Es este punto el más crítico, el de repartir las masas y los pesos, por eso es tan importante un buen diseño para que al aplicarse el principio de Arquímedes: "*un cuerpo total o parcialmente sumergido en el agua experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del agua desalojada*", la estructura sea estable en todo momento durante el funcionamiento de los aerogeneradores incluso ante condiciones adversas del mar.

La energía de los aerogeneradores se evacua a una subestación de distribución mediante una línea eléctrica para posterior transportarla hasta el consumidor. Si el parque está situado lejos de la costa, primero se evacúa la electricidad a una subestación marina (flotante o cimentada), elevándose el voltaje de la potencia generada por las turbinas, para posteriormente transportarla hasta la subestación terrestre. En la siguiente ilustración, (**Error! Reference source not found.**) se pueden

observar las distintas instalaciones que componen un parque eólico offshore. Donde se puede observar el propio parque eólico, la subestación a la que se conectan todos los aerogeneradores en el mar y como a través de un cable se evacúa a tierra a otra subestación offshore. Además, recoge los barcos usados para su construcción.



Figura 20. Construcción de un parque eólico marino (Iberdrola, 2024).

AEROGENERADOR

Tanto los aerogeneradores marinos como terrestres se basan en el mismo fundamento tecnológico con la diferencia de su ubicación y potencia siendo la de los marinos de entre 10 y 15 MW y la de los terrestres de entre 5 y 8 MW. Esto se traduce en una mayor área de barrido por parte de los offshore y por tanto un mayor tamaño, requiriendo por tanto un anclaje seguro. Aparte del tamaño otro factor determinante es la profundidad y el estado del fondo marino. Actualmente se trabaja en profundidades entorno a 30 metros, aunque se están desarrollando proyectos experimentales de hasta 50 m, pero no se encuentran en la normalidad comercial.

Se pueden clasificar en dos grupos los aerogeneradores según el tipo de anclaje del propio aerogenerador: plataformas fijas o móviles.

ESTRUCTURA FIJA

Como se ha explicado anteriormente los aerogeneradores se diferencian según están o no anclados y dentro de los anclados en el lecho marino o también conocidos como “bottom fixed”, se clasifican según el tipo de anclaje:

- **Monopilote:** se trata de un diseño simple, que consiste en un tubo o pilote de acero de unos tres o cinco metros de diámetro enterrado en el lecho marino sobre el que se ancla el aerogenerador. La profundidad de penetración depende de las condiciones del entorno y el suelo marino, pero suele rondar los diez o veinte metros. Aunque se puede instalar hasta en profundidades de 30 m, no se suele hacer en profundidades mayores a 15 m, ya que los costes se disparan y es mejor usar otras cimentaciones. También en este tipo de cimentaciones se presta atención a la altura del buje, procurando que no sea muy alta para evitar cargas a flexión y pandeo exagerados.

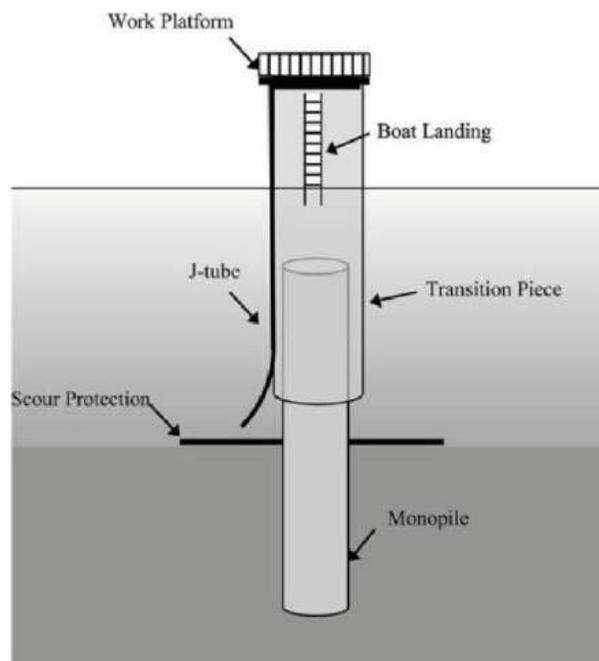


Figura 21. Cimentación monopilote (ResearchGate).

Como se puede observar en la anterior ilustración (Figura 21) este tipo de cimentación se divide en tres partes fundamentalmente: el propio pilote enterrado en el suelo marino, la zona de transición que se ancla en la parte del pilote en contacto con el agua y lleva hasta la superficie donde se instala la tercera parte, la plataforma de hormigón del aerogenerador.

- Base de apoyo por gravedad:** se emplean en zonas con menos de diez metros de profundidad y consisten en una gran zapata de hormigón que descansa directamente sobre el lecho marino previamente preparado, soportando con la propia gravedad las cargas eólicas e hidráulicas. Entre sus ventajas se encuentra el uso del hormigón que soporta mejor que el acero la corrosión, pero su mayor inconveniente es la profundidad de instalación ya que el coste depende del cuadrado de la profundidad. En la siguiente (Figura 22) imagen se puede observar la comparativa de esta cimentación respecto a la anterior vista de monopilote y ver la diferencia en cuanto a la instalación final en la parte sumergida en el agua, ya que vistas desde la superficie no presentan diferencias.

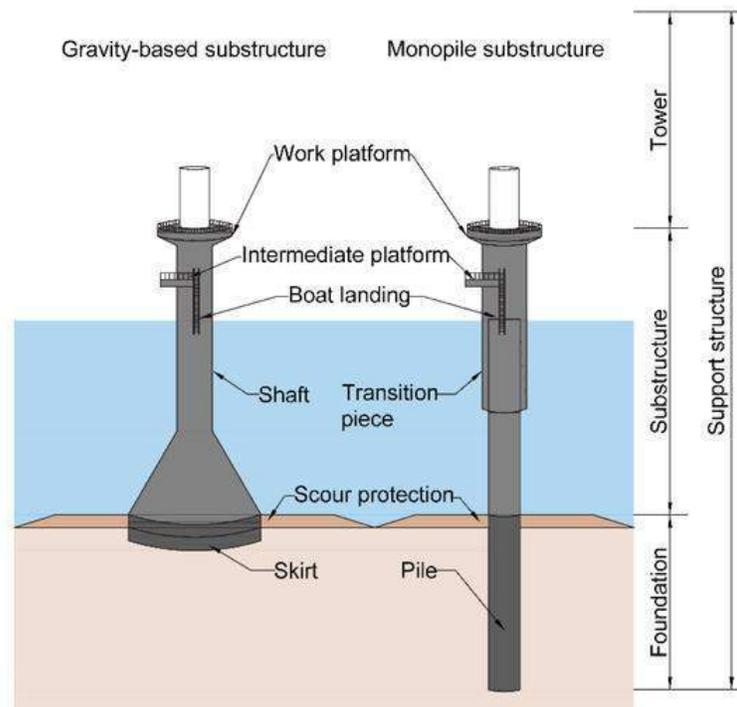


Figura 22. Comparativa entre cimentación monopilote y por gravedad (MDPI, 2021).

- Trípode:** se diseñan para profundidades de 30 metros o más y consisten en un trípode de barras de acero colocadas a 120° cada una, ancladas al fondo marino mediante pilotes y conectados los tres aun pilar central donde se instala la torre del aerogenerador. Este sistema permite distribuir las cargas y fuerzas del mar y el viento entre los tres puntos y es idónea para instalaciones en profundidades de más de 25 metros, mientras que no es recomendable para su instalación en suelos poco nivelados horizontalmente y suelos rocosos.

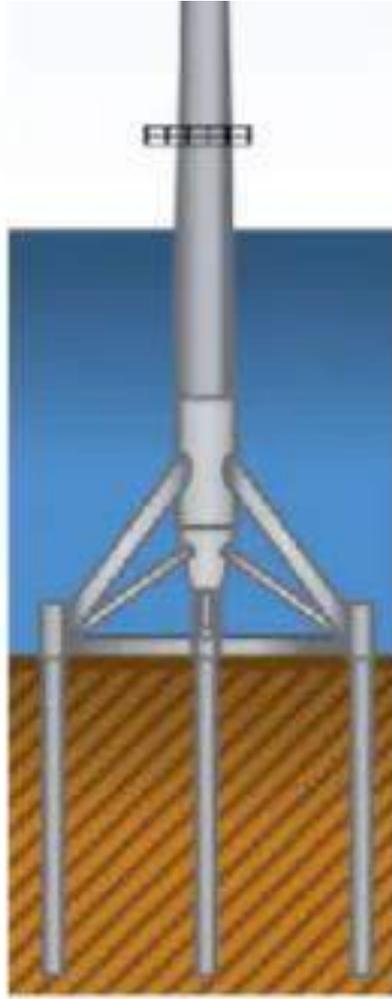


Figura 23. Cimentación trípode (Construction physics).

- **Tripilote:** se trata de un híbrido entre trípode y monopilotes. Consiste en tres pilotes colocados en paralelo y unidos en su base, dando así una mayor estabilidad y pudiéndose instalar en profundidades de hasta 50 metros.



Figura 24. recreación de una cimentación tripilote (Roca, 2018).

- **Jacket:** este tipo de cimentación se inspira en las plataformas petrolíferas de alta mar, que consisten en cuatro puntos de apoyo unidos mediante celosías que distribuyen las cargas. Un diseño presente también en las torres de alta tensión. Se anclan al fondo del mar mediante pilotes y deben ser transportados en barcos especiales ya que van en una sola pieza. A pesar de su elevado coste mediante economía de escala se puede lograr reducir los costes. Se pueden instalar en profundidades de hasta 60 metros. Entre sus otras ventajas se destaca la baja oposición a las fuerzas horizontales del mar debido a sus secciones pequeñas de las barras de acero y su resistencia al vuelco.



Figura 25. Cimentaciones tipo *jacket* del parque eólico marino de *Wikinger* (Iberdrola, s.f.).

Aunque se suelen instalar *jacket* con cuatro barras se están desarrollando también cimentaciones tipo *jacket* con tres únicos apoyos como el *East Anglia ONE*, lo que supone un reto para la ingeniería en esa búsqueda por recortar costes. En la siguiente ilustración (Figura 26) se comparan dos modelos de *jacket*, uno con tres barras de apoyo y otro de cuatro.



Figura 26. Comparativa de los *jackets* de *East Anglia ONE* y *Wikinger* (Iberdrola, s.f.).

ESTRUCTURA FLOTANTE

Cuando la profundidad de las zonas del mar donde se quiere instalar el parque eólico supera los 50 metros ya no se usan cimentaciones, sino que se instalan estructuras flotantes. Actualmente en uso existen hasta cuatro tipos de tecnologías flotantes:

- **Barge o Barcaza.** Se trata de una tecnología similar a un barco, que tiene gran parte de su estructura sumergida y se mantiene a flote, mediante la distribución de la flotabilidad. En cuanto a sus dimensiones, la estructura es similar a la de un barco. Para minimizar los posibles movimientos se colocan arfados o *heave plates* bajo la línea de flotación.
- **Semi-sumergible o semi-sumergible.** La idea principal de este sistema es minimizar la superficie en contacto con el agua del mar, pero maximizando el volumen que aporta flotabilidad. Para lograr este efecto se construyen estructuras de barras cilíndricas o paralelepípedos verticales unidos con vigas.
- **Spar.** Esta tecnología consiste en un cilindro flotante con la mayor parte del peso en la zona más inferior, logrando así bajar el centro de gravedad y una mayor flotabilidad. Cuanto mayor sea el tamaño de las turbinas mayor es el tamaño de estas estructuras y por tanto más difícil es el transporte y montaje.
- **Tensioned Legs Platform (TLP) o mooring line stabilized.** Se trata de la tecnología más novedosa y se diferencia principalmente en dos aspectos con respecto al resto: es la única estructura con los tirantes de anclaje al fondo en tensión y la única también que no se encuentra flotando una vez se instala el aerogenerador. Sin la turbina instalada la estructura sí que flota y esto se logra usando el menor volumen posible con una geometría de tres o hasta cinco brazos.

En la siguiente ilustración se recogen de forma esquematizada los cuatro tipos de instalaciones flotantes, donde se pueden observar detalles como los anclajes al fondo marino, siendo los de los TLP los únicos en tensión y además se pueden observar las diferentes formas.

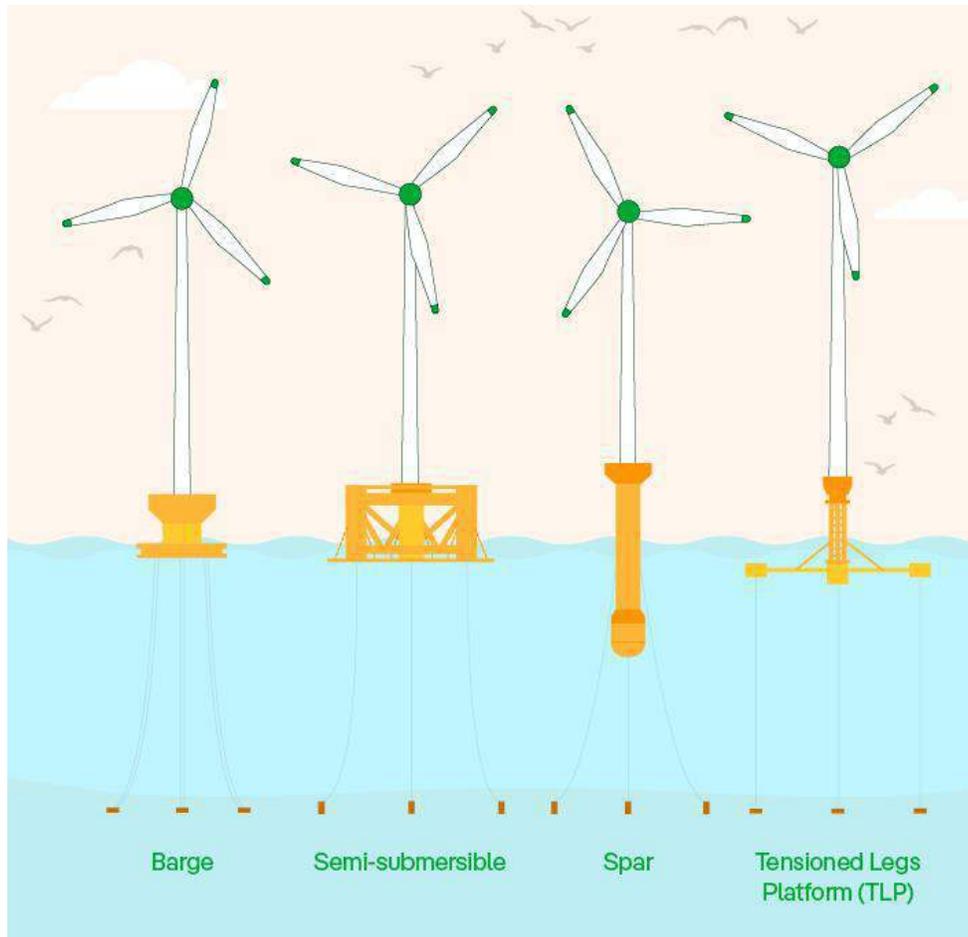


Figura 27. Tipos de plataformas flotantes para aerogeneradores (Iberdrola, s.f.).

AMARRE DE ESTRUCTURAS OFFSHORE

Los aerogeneradores tanto si están instalados en plataformas flotantes como en plataformas fijas es necesario que estén amarrados para una mayor seguridad y estabilidad frente a las fuerzas del viento y el mar. Estos marrees se hacen con cadenas o cables de acero o incluso de materiales sintéticos como el nailon o el poliéster, dando una mayor ligereza y facilidad de manejo y siendo más resistentes frente a la corrosión, aunque presenten una menor durabilidad. De entre los tipos de amarre que existen se exponen a continuación cuatro:

- **Catenaria:** Consiste en cables de acero con la curva catenaria entre la plataforma y el anclaje. Es un amarre de simple y económica instalación pero que requiere de una gran área de trabajo y aguas no muy profundas.
- **Taut o Tension leg platform (TLP).** Consiste en cables o cadenas en tensión, logrando una gran estabilidad vertical y un mínimo movimiento. Es un sistema adecuado para profundidades de entre 100 y 200 metros. Sus desventajas son el coste de instalación por la necesidad de mantener la tensión de los cables y la necesidad de un lecho marino firme. Es común su uso en ubicaciones con condiciones especialmente adversas y gran profundidad.

- **Semi-tensado:** Se trata de una combinación entre catenaria y TLP, uniendo cables en forma de catenaria con otros en tensión. Esto ofrece estabilidad y flexibilidad, logrando un menor movimiento que las catenarias. Es un sistema más complejo y costoso de instalar que el amarre en catenaria. Se suele instalar en profundidades de unos 100 metros y con condiciones variables del mar.
- **Espiral o *spiral mooring*:** Consiste en cables enrollados en espiral proporcionando flexibilidad, una mayor absorción de energía y una mejor distribución de fuerzas. Su desventaja es que se trata de un sistema poco desarrollado en la industria.

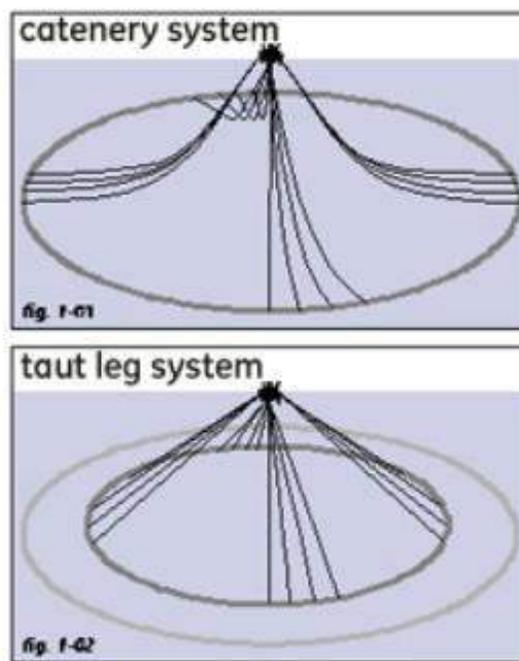


Figura 28. Dos tipos de sistemas de amarre (ESRU, 2024).

ANCLAJE DE ESTRUCTURAS OFFSHORE

Además, una vez vistas las plataformas que sostienen los aerogeneradores y los cables que les dan estabilidad toda vez las formas de anclaje fundamentales para dar estabilidad a las estructuras. En concreto se van a presentar cinco formas de anclaje con sus ventajas y sus inconvenientes.



Figura 29. Punto de anclaje de un aerogenerador marino (Freepik, s.f.).

- **Gravedad o peso muerto:** consiste en estructuras pesadas de gran densidad en hormigón o acero que se dejan caer sobre el fondo marino. Es un sistema simple y reutilizable pero que puede presentar dificultades de instalación debido a su gran peso y solo se puede usar en suelos con poco desnivel horizontal.
- **Succión:** se trata de cilindros insertados en el fondo, creando un vacío en su interior que lo mantienen en su lugar. Entre sus ventajas se encuentran la rápida instalación, su bajo impacto en el suelo marino y su idoneidad en suelos blandos. No siendo nada recomendable para suelos rocosos o muy duros. En la siguiente ilustración se muestra su instalación:

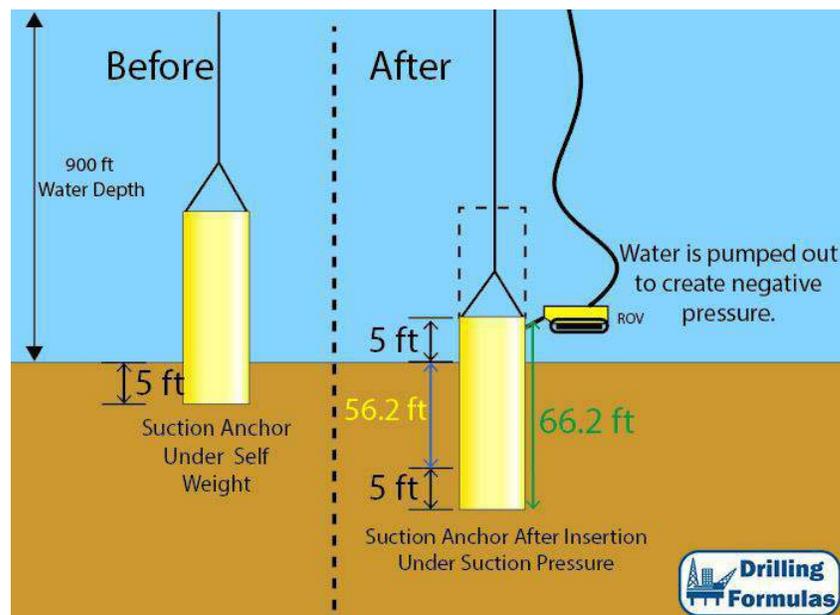


Figura 30. Diagrama del anclaje de succión (Drilling Formulas).

- **SEPLA (Suction Embedded Plate Anchors):** combina succión y placas dando una gran estabilidad en suelos blandos. Su instalación consiste en un cilindro de succión donde se

introduce la placa y tras retirar el tubo queda firmemente. Requieren un sistema de instalación especializado, pero generan pocas perturbaciones en el lecho marino.

- **Arrastre:** se trata de estructuras que trabajan horizontalmente, para ello se entierran los *flukes* tras ser arrastrados por el suelo marino. Son de fácil desinstalación, basta con ejercer una fuerza vertical. Generan un gran impacto medioambiental en el lecho marino y pueden no ser los más recomendados para suelos inestables.
- **VLA (*Vertical Load Anchor*):** se trata de un ancla de arrastre que además de fuerzas horizontales soporta fuerzas verticales. Su instalación es igual a las de arrastre, pero debido a su geometría queda de tal forma que soporta las fuerzas verticales.



Figura 31. Ancla VLA (Nautic expo, s.f.).

CAPÍTULO 4. MARCO LEGAL

El trabajo previo para instalar un parque eólico offshore es marcar una serie de puntos o criterios que debe cumplir nuestra instalación para que sea viable. Para ello debemos atender tanto a criterios técnicos, legales, ambientales, logísticos, sociales como económicos. Estos dos últimos criterios serán tratados es sucesivos apartados.

LEGALIDAD

Antes de abordar un proyecto de las características de un parque offshore es necesario consultar las leyes vigentes tanto a nivel nacional como regional.

Esta normativa a nivel nacional se basa en cuatro leyes básicas desarrolladas en los últimos años y la normativa técnica y de seguridad:

- **Ley de Costas (Ley 22/1988, de 28 de julio):** *“Con respecto a la utilización del dominio público marítimo-terrestre, se establece una regulación eficaz de los diferentes usos, que incluye, tanto el uso común natural, libre y gratuito, como el uso especial, objeto de autorización, que abarca los casos de intensidad, peligrosidad, rentabilidad y las instalaciones desmontables, y las ocupaciones con obras fijas, objeto de concesión”* (BOE, 1988).

Esta ley trata cualquier tipo de ocupación del suelo marino para cualquiera que sea su uso y explotación, estableciendo así procedimientos para la obtención de autorizaciones y permisos.

- **Ley 21/2013, de Evaluación Ambiental:** *“La evaluación ambiental resulta indispensable para la protección del medio ambiente. Facilita la incorporación de los criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas, a través de la evaluación de los planes y programas. Y a través de la evaluación de proyectos, garantiza una adecuada prevención de los impactos ambientales concretos que se puedan generar, al tiempo que establece mecanismos eficaces de corrección o compensación.”* (BOE, 2013)

Esta ley que contiene una última modificación del 6 de diciembre de 2018 y su texto plantea la necesidad de valorar el posible impacto ambiental y social de un proyecto y sus posibles soluciones mediante una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).

- **Real Decreto 1028/2007, de 20 de julio:** *“El presente real decreto tiene por objeto la regulación de los procedimientos, así como la determinación de las condiciones y criterios que han de regir para la obtención de las autorizaciones y concesiones administrativas precisas para la construcción y ampliación de las instalaciones de generación de electricidad que se encuentren ubicadas físicamente en el mar territorial”* (BOE, 2007)

Este texto regula específicamente el uso de instalaciones eléctrica en suelo marino, detallando criterios y requisitos técnicos, administrativos y legales para la construcción,

explotación y mantenimiento de parques eólicos offshore, con el fin de lograr la seguridad de las instalaciones y la protección del medio ambiente marino.

- **Ley 24/2013, del Sector Eléctrico:** *” El suministro de energía eléctrica constituye un servicio de interés económico general, pues la actividad económica y humana no puede entenderse hoy en día sin su existencia. La ordenación de ese servicio distingue actividades realizadas en régimen de monopolio natural y otras en régimen de mercado.”* (BOE, 2013)

Con esta ley se busca ordenar y organizar todo el sector eléctrico español, especificando las condiciones del mercado, métodos de conexión y otros requisitos para logara una buena conexión, atendiendo también a las energías renovables.

Además de estas leyes y reales decretos siempre que se realiza una construcción o explotación se debe cumplir con la Normativa Técnica y de Seguridad que recoge los estándares técnicos y de seguridad que permiten un buen funcionamiento y la minimización de posibles accidentes.

Por otra parte, también se atiende a las leyes de ámbito regional de la isla de Formentera impulsadas por la Dirección General de Energía y Cambio Climático de las Islas Baleares. Entre la normativa más relevante se encuentra el Plan territorial insular de Formentera que determina que suelos son aptos para la instalación de infraestructuras, la Normativa de protección del medio marino, que busca proteger la biodiversidad marina mediante el cumplimiento de estándares ambientales, y la posibilidad de consultas y participación pública para planificar autorizar proyectos.

PERMISOS Y LICENCIAS NECESARIAS

Cumpliendo las leyes y normas expuestas en el anterior apartado, antes de empezar la construcción se deben obtener una serie de permisos y licencias:

- **Permiso de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA):** este permiso depende del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y trata de evaluar el impacto de la fauna y la flora en el entorno donde se instala la construcción a partir de estudios ambientales e informes técnicos.
- **Autorización Administrativa Previa:** se trata de un permiso para autorizar la viabilidad de la instalación. Depende del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO)
- **Permiso de Construcción y Obra:** es el permiso propio de la construcción del proyecto para el que se deben presentar planes de construcción viables y la gestión de residuos. Depende del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y de las autoridades locales.
- **Licencia de Uso del Dominio Público Marítimo-Terrestre:** permite el uso de las áreas mar, tras presentar la descripción del uso a dar y el impacto. Esta licencia depende de Dirección General de la Costa y el Mar (DGCM).

- **Permiso de Conexión a la Red Eléctrica:** Este permiso que depende de Red Eléctrica de España (REE) y Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), necesario para poder verter la energía generada a la red. Para poder obtenerlo es necesario presentar un estudio de conexión con las infraestructuras a desarrollar.
- **Autorización de Navegación y Seguridad Marítima:** tras presentar un plan de seguridad para las rutas marítimas Capitanía Marítima y Puertos del Estado, te da el permiso siempre y cuando no se interfiera a la navegación desarrollada en esa zona elegida para el proyecto.
- **Permiso de Instalación de Cables Submarinos:** para evacuar la energía de ellos aerogeneradores hacia tierra se necesitan cables que pasan por el fondo marino, luego su instalación requiere del permiso de MITECO y Dirección General de Política Energética y Minas, tras analizar el impacto y la viabilidad del plan
- **Autorizaciones Locales y Municipales:** por último, las autoridades locales como ayuntamientos determinarán o añadirán requisitos legales según su propio marco legal.

Es fundamental siempre a medida que desarrollas el proyectos comprobar en paralelo si se cumplen con las exigencias legales y asegurarse antes de iniciar la construcción de contar con todas las licencias para evitar problemas.

CAPÍTULO 5. CRITERIOS PARA LA LOCALIZACIÓN

COMPATIBILIDAD AMBIENTAL

Las infraestructuras además de ser viables a nivel técnico y económico deben de ser sostenibles en el plano ambiental y ecológico. Para ello, como se ha expuesto en el apartado anterior sobre legalidad, es necesario según la ley elaborar un informe que recoja el posible impacto de un proyecto de tal magnitud. No obstante, antes de realizar ese estudio es preciso y recomendable hacer una primera selección sin entrar quizá en grandes detalles de las mejores ubicaciones a nivel ambiental. Para ello, se usan mapas que recogen las zonas marinas protegidas del país como la Figura 32:

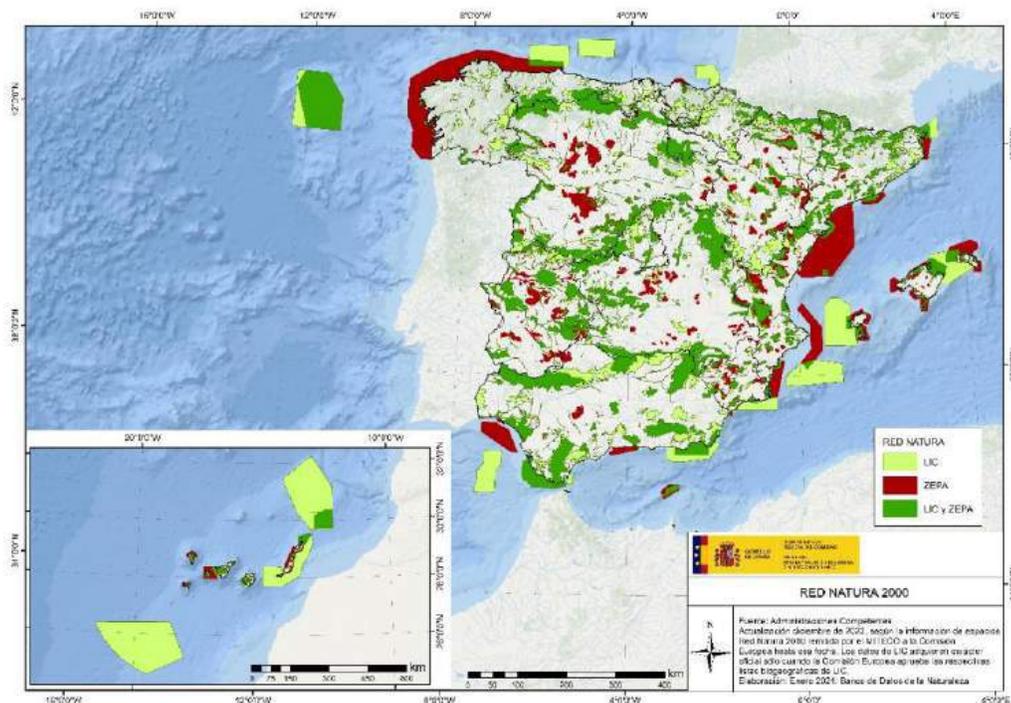


Figura 32. Mapa de la red natura 2000 (Gobierno de España, s.f.).

A priori la zona balear presenta una gran cantidad de espacios protegidos por lo que será una de las grandes dificultades en cuanto a la viabilidad de la instalación del parque eólico offshore. En esta imagen (Figura 32) no se puede apreciar con exactitud qué zonas son aptas para la instalación del parque por lo que será necesario hacer un estudio más profundo, a través de mapas con más detalles como los siguientes que se adjuntan (Figura 33 y Figura 34) e información extra.

En la isla de Formentera se pueden localizar cuatro grandes reservas concentradas en dos áreas. Por una parte tenemos el área del norte de la isla con el Parque Natural de *Ses Salines d'Eivissa i Formentera* y la Reserva Marina de *Es Freus*, donde se encuentra una importante población de posidonia oceánica, además de ser un hábitat habitual de aves marinas. Su ubicación dentro de los límites de la isla se puede observar en la Figura 33 junto con las coordenadas de la Tabla 6. Por otra



Figura 34. Recorte mapa de reservas marinas de las Islas baleares (Gobierno de las Islas baleares, s.f.).

Coordenades en ETRS89		
Coordenadas en ETRS89 - Coordinates on ETRS89		
A: 38° 52'23,0"N - 01° 24'18,8"E	H: 38° 43'11,6"N - 01° 30'26,0"E	a: 38° 48'36,6"N - 01° 29'29,0"E
B: 38° 53'27,6"N - 01° 26'30,0"E	I: 38° 43'11,6"N - 01° 28'16,0"E	b: 38° 46'48,6"N - 01° 28'49,1"E
C: 38° 53'28,6"N - 01° 27'30,0"E	J: 38° 38'29,1"N - 01° 23'07,7"E	c: 38° 47'16,8"N - 01° 28'49,1"E
D: 38° 52'23,0"N - 01° 26'00,0"E	K: 38° 43'06,6"N - 01° 21'07,9"E	d: 38° 47'50,7"N - 01° 28'26,5"E
E: 38° 48'52,2"N - 01° 29'29,0"E	L: 38° 45'58,6"N - 01° 24'07,0"E	e: 38° 48'36,6"N - 01° 27'50,0"E
F: 38° 46'48,6"N - 01° 29'29,0"E	M: 38° 50'43,6"N - 01° 20'47,0"E	f: 38° 45' 30,0"N - 01° 26' 08,2"E
G: 38° 45'12,6"N - 01° 28'20,0"E	N: 38° 51'21,0"N - 01° 19'12,9"E	g: 38° 47'56,6"N - 01° 25' 18,0"E
		h: 38° 48'52,2"N - 01° 24'42,4"E

Tabla 6. Coordenadas de las reservas marinas de Formentera de la Figura 33.

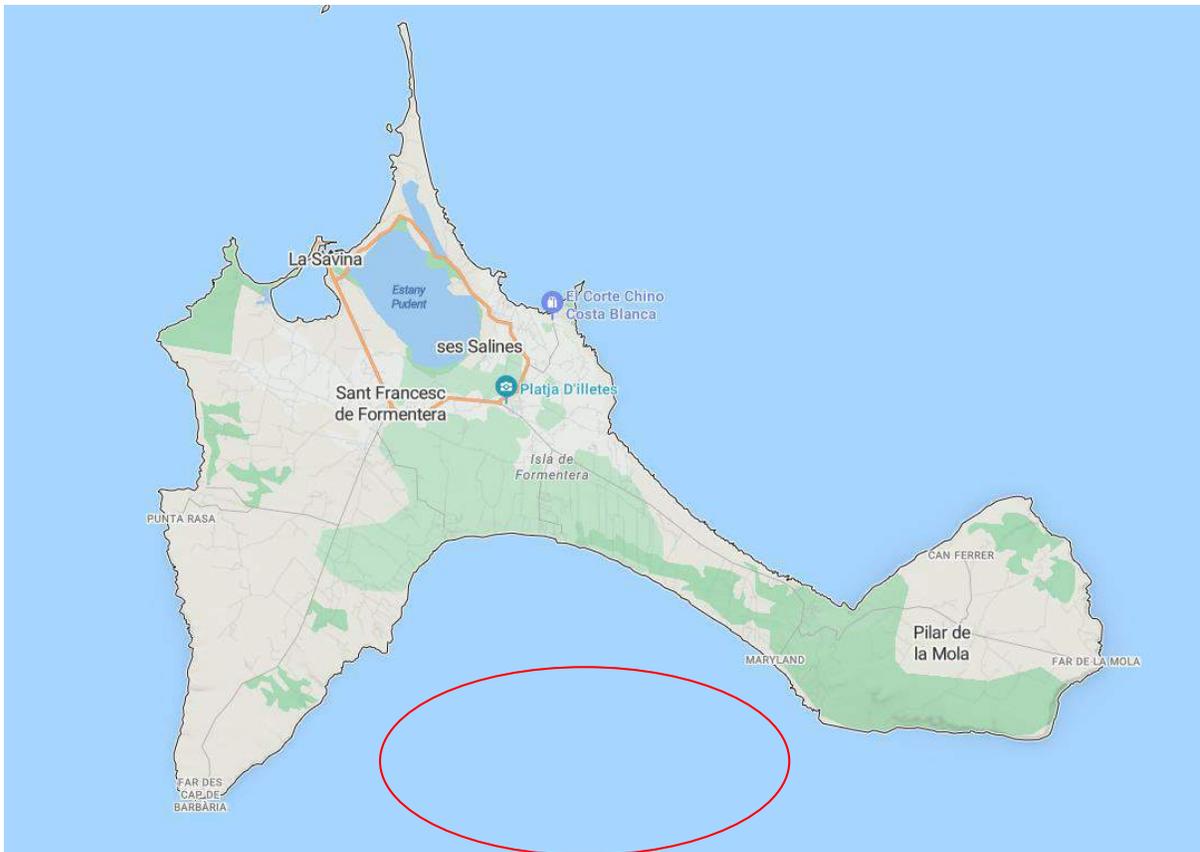


Figura 35. Mapa de Formentera con un posible área de trabajo (Google, 2024).

COMPATIBILIDAD CON OTRAS ACTIVIDADES PROFESIONALES

Otro punto a tener en cuenta es el posible tráfico marítimo de los alrededores de la isla para evitar posicionar el parque en una zona típica de las rutas de los barcos, ya que además de ser un obstáculo para las embarcaciones estas a su vez generan un oleaje que se debe tener en cuenta a la hora de diseñar. Luego evitando estas zonas se eliminan problemas. En este caso las zonas de mayor tráfico marítimo coinciden con las áreas descartadas anteriormente por no ser viables a nivel medioambiental. Por lo tanto, no ofrece ninguna limitación extra como así muestra la Figura 36:

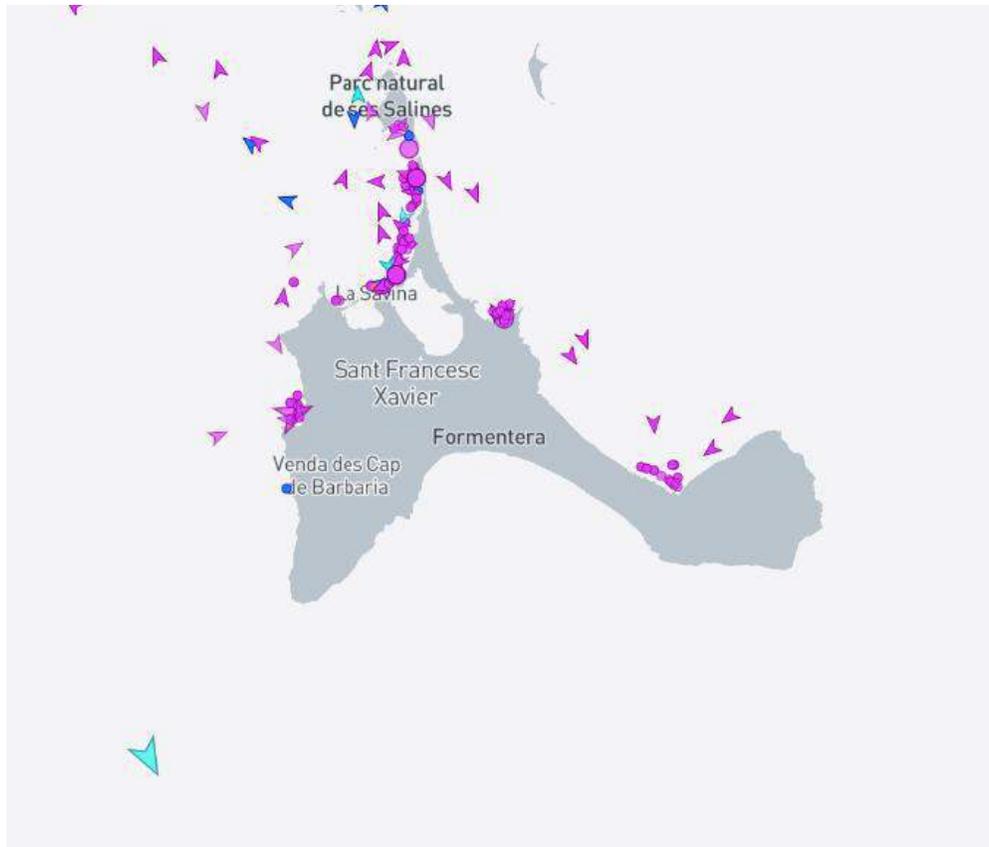


Figura 36. Densidad de tráfico marítimo en los alrededores de Formentera (Marine traffic, s.f.).

OLEAJE

Un aspecto más a tener en cuenta es el oleaje de la zona, tanto para calcular las posibles fuerzas que van a sufrir los aerogeneradores y sus plataformas como para el montaje y mantenimiento del parque ya que un oleaje de gran potencia dificulta los trabajos. En Formentera como en el resto del Mediterránea, las olas no suelen ser grandes y suelen rondar los 0,5 y 3 metros, aunque existan episodios de gran oleaje fruto de tormentas, la Tabla 7 que se adjunta a continuación se recogen los datos de oleaje en las costas de Formentera, a partir de los datos históricos.

Estación del año	Altura promedio del oleaje (m)	Altura máxima del oleaje (m)	Intensidad	Zonas afectadas
Invierno	1,5-3	4-5	Alta	Norte y noroeste
Otoño	1-2	3-4	Media alta	Sur y suroeste
Primavera	0,5-1,5	2-3	Media	Todas
Verano	0,2-0,5	1	Baja	Todas

Tabla 7. Datos del oleaje en Formentera (elaboración propia con datos de *Windy*).

FONDO MARINO

La batimetría es la disciplina encargada de estudiar los fondos marinos y además de ser fundamental para las rutas marítimas con el desarrollo de estructuras offshore es de gran utilidad para el diseño de los parques eólicos marino, ya que permite descartar o aceptar ciertas zonas.



Figura 37. Mapa de Formentera con las líneas de profundidad (EMODnet, s.f.).

Observando el anterior mapa (Figura 37) se pueden descartar posibles zonas de trabajo, como son todas aquellas que se encuentran fuera de la línea de profundidad de 50m, puesto que ya 50 metros se presenta como una profundidad crítica, pero viable a nivel técnico con el uso de parques con plataformas flotantes.

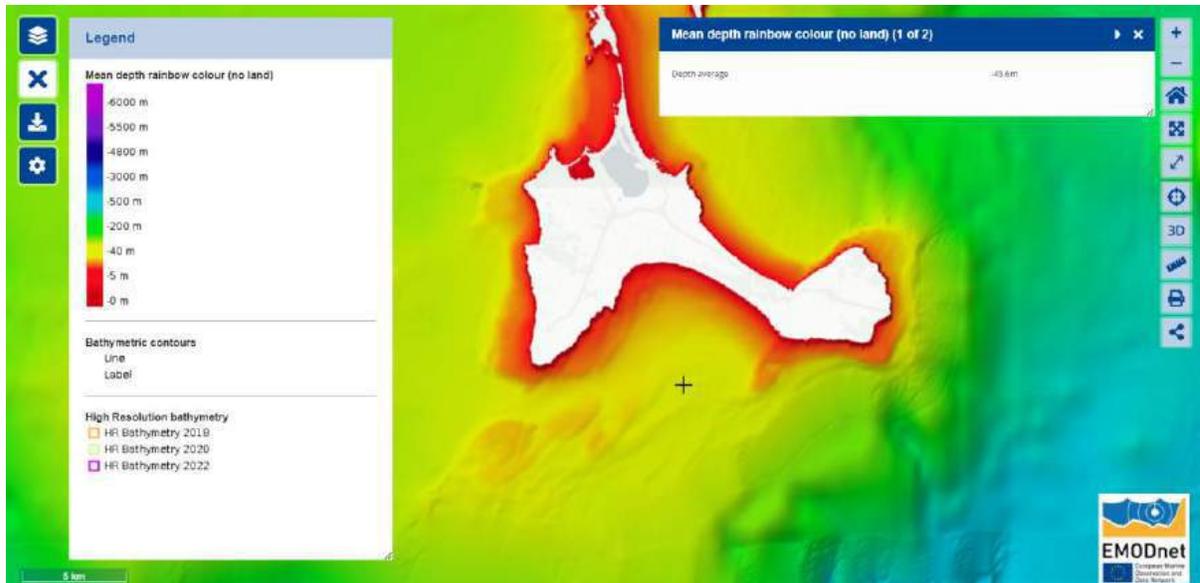


Figura 38. Mapa de Formentera con las líneas de profundidad y escala de colores (EMODnet, s.f.).

En este otro mapa con código de colores, también se ha colocado un posible punto donde instalar el parque teniendo en cuenta los criterios ambientales y de tráfico marítimo. Este punto tiene una profundidad de más de 45 metros. En concreto de 45,6 m, luego desde el punto de vista de la profundidad no parece que vaya a existir un gran problema más allá de que se tendrá que realizar un diseño con la tecnología más apropiada.

Por otra parte, el estudio del suelo también incluye estudiar la composición de este. En este caso en Formentera se pueden encontrar hasta cuatro tipos de suelos distribuidos por sus costas. N primer lugar las conocidas praderas de posidonia oceánica, estas zonas están totalmente protegidas y se ubican en la zona norte y noroeste, coincidiendo con el Parque Natural de *Ses Salines d'Eivissa i Formentera* y la Reserva Marina de *Es Freus*, a una profundidad de entre 30 y 40 metros. En la zona del este y sureste los suelos se caracterizan por ser fangosos y contener sedimentos finos en profundidades cercanas a 30 metros. Estos suelos nos son muy recomendable para la instalación de parques eólicos. Primeramente, por ser espacios protegidos y luego por su dificultad técnica para el anclaje de plataformas. También se pueden encontrar zonas rocosas en áreas del suroeste y en algunas partes del este de la isla, cercanas a formaciones geológicas. A pesar de existir todos estos tipos de suelo, el más común el fondo marino arenoso desde las costas más próximas hacia el mar en plataformas continentales, especialmente n al zona sur y oeste.

VIENTO

El viento se trata del recurso eólico que se debe aprovechar en este parque, luego su viabilidad dependerá en gran medida de la calidad de este recurso en esta zona. Es un factor determinante y crucial pues en ausencia de viento, no sirve de nada instalar los mejores aerogeneradores ni desarrollar tecnologías pioneras o incluso saltarnos restricciones ambientales.

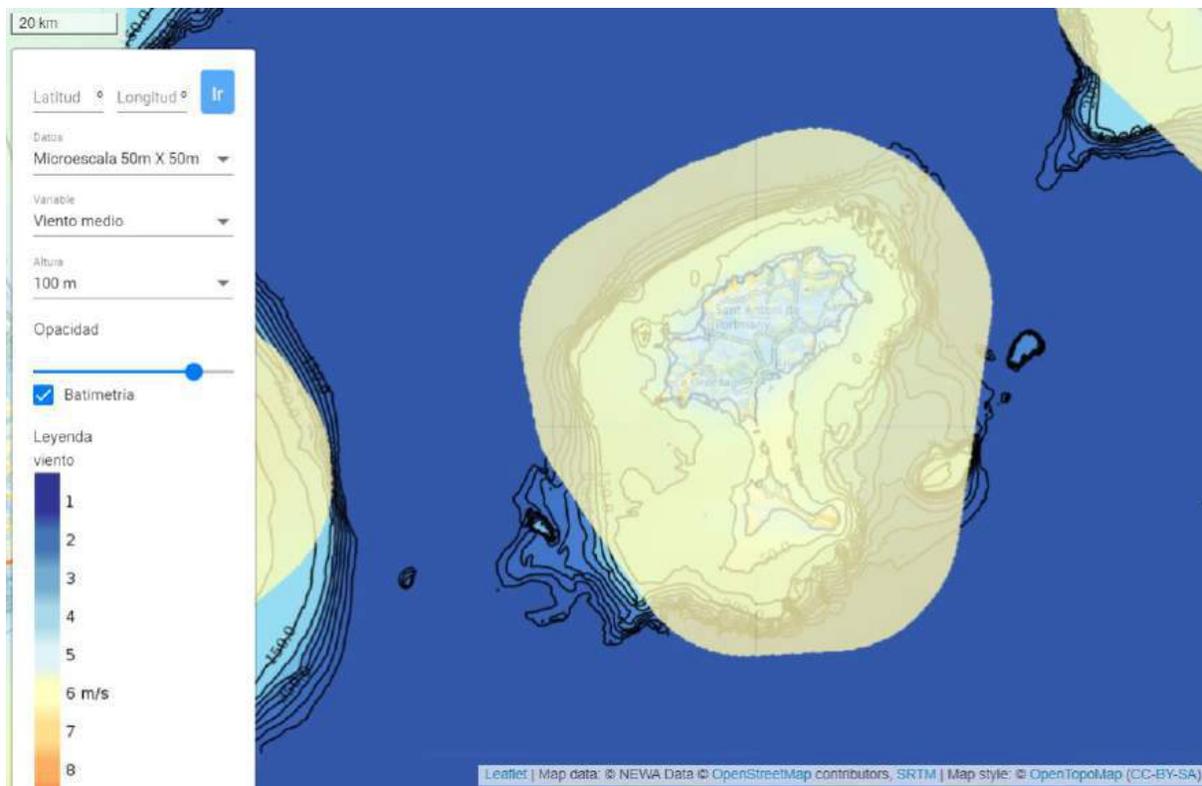


Figura 39. Mapa de vientos medios de las islas de Ibiza y Formentera con escala (Mapa eólico ibérico, 2024) .

Como se puede observar en la Figura 39 con ayuda de la escala, la velocidad media de los vientos en Formentera se sitúa cerca de los 6 m/s, una velocidad suficiente para poder plantearse a priori instalar un parque eólico, puesto que supera los 5m/s de velocidad típicamente mínima. Esta velocidad no nos asegura un gran rendimiento, ni la viabilidad económica, sino que nos da una idea de lo esperado en esa zona.

Aunque esta es la velocidad media a lo largo del año se dan momentos de mayor velocidad de las rachas de viento y a modo de resumen se ha elaborado la tabla a partir de los datos de sitios web como Windy y la AEMET.

Viento	Época	Velocidad media (m/s)	Velocidad máxima (m/s)
Tramontana	Diciembre a marzo	5.6 - 8.3	19,4 - 25
Mistral	Diciembre a marzo	4,2 – 6,9	16,7 – 22,2
Levante	Septiembre a noviembre, marzo a mayo	2,8 – 5,6	13,9 – 19,4
Siroco	Marzo a agosto	5,6 – 8,3	13,9 – 19,4

Lebeche	Junio a agosto	4,2 – 6,9	11,1 – 16,7
Gregal	Septiembre a noviembre, marzo a mayo	2,8 – 5,6	11,1 – 16,7

Tabla 8. Resumen de los tipos de vientos en Formentera (elaboración propia con datos de Windy y la AEMET)

A partir de la anterior tabla (Tabla 8) se puede conocer de manera aproximada los vientos y su intensidad esperada a lo largo de todo el año. Una información muy importante de cara a elegir el modelo de aerogenerador y su orientación con la intención de lograr el mayor rendimiento. Como se puede leer en la tabla anterior, los vientos de mayor intensidad son tramontana y luego siroco y lebeche. A pesar de que el viento de tramontana se presente como el mejor recurso por las velocidades media que mantiene, parece un buen planteamiento orientarlo en esa dirección, puesto que este viento es predominante entre los meses de diciembre y marzo coincidiendo con una época de baja demanda por no ser época estival. En cambio, los vientos de siroco y lebeche predominan en la época de verano y sus direcciones tienen componente sur, siendo de sentido sudeste y suroeste respectivamente. Por lo tanto, parece razonable darles a los aerogeneradores una orientación sur para aprovechar ambos vientos en la época de mayor demanda.

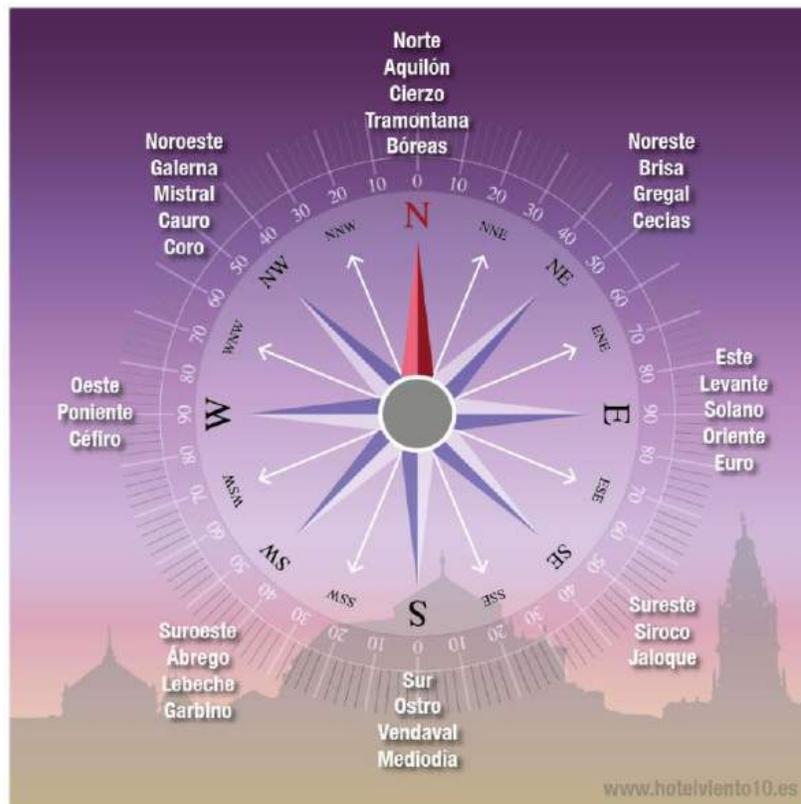


Figura 40. Rosa de los vientos (Viento 10, 2018).

UBICACIÓN FINAL

Tras estudiar y recoger los datos de los diferentes factores se puede determinar una ubicación final para la instalación del parque eólico sin atender a criterios de rendimientos y rentabilidad, que se verán en los sucesivos apartados. Esta ubicación sería el área señala en la Figura 35 y en concreto se señala un punto entorno, al cual sería razonable su instalación, cuyas coordenadas se especifican en la Figura 41, que se encuentra a algo más de 4 km respecto a la playa de *Migjorn* como así indica la Figura 42.

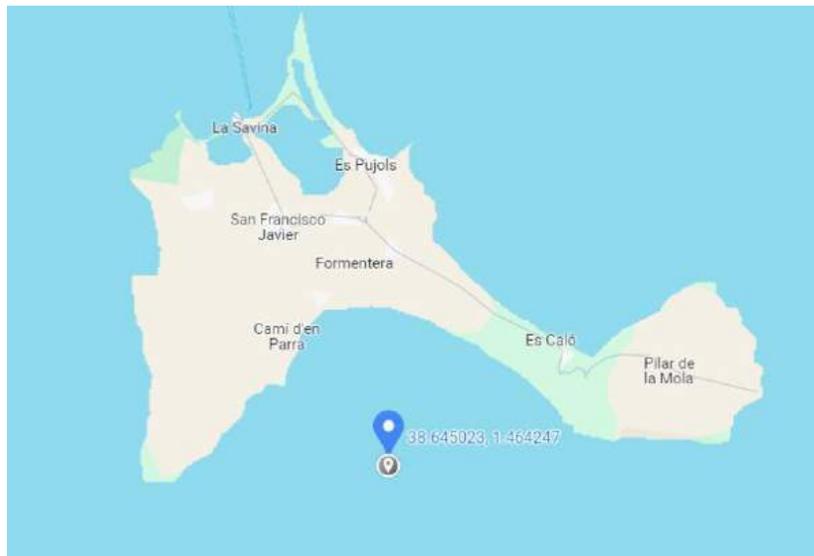


Figura 41. Ubicación posible del parque eólico offshore.

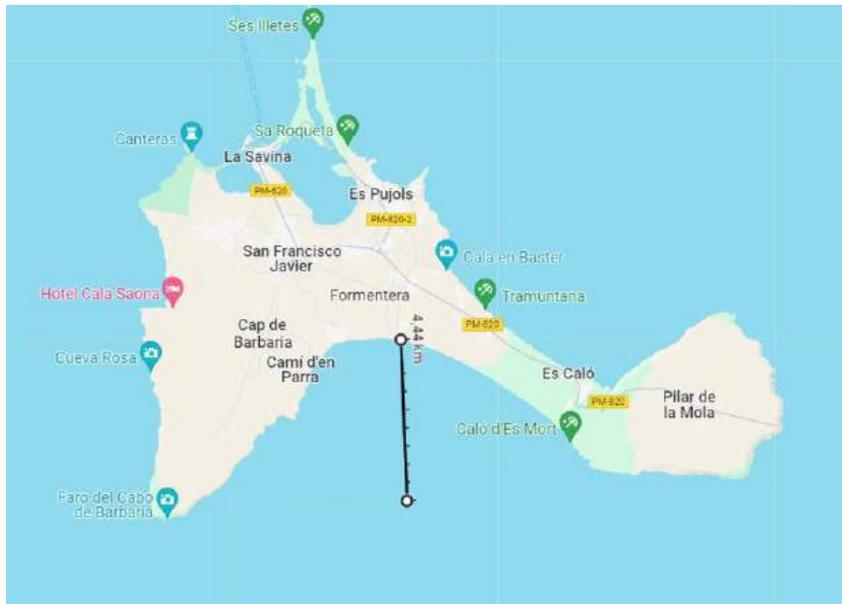


Figura 42. Distancia de la posible ubicación respecto a la costa de Formentera (Google, 2024).

CAPÍTULO 6. DISEÑO Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL PARQUE EÓLICO OFFSHORE

Tras un previo análisis sobre la mejor ubicación del parque, lo siguiente es seleccionar la mejor tecnología posible que ofrezca el mayor rendimiento en función de las exigencias de la propia ubicación. A pesar de que se podrían diseñar parques eólicos para cualquier ubicación debido a la fuerte inversión en I+D+I por parte de Estados y empresas logrando un gran avance tecnológico, en este caso se va a optar por tecnologías ya consolidadas y disponibles. Los campos en los que se va a prestar atención son:

- Modelo de aerogenerador
- Tecnología de plataforma: fijas y flotantes
- Diseño de la plataforma
- Forma de fondeo

SELECCIÓN DEL MODELO DE AEROGENERADOR

Los aerogeneradores son la pieza clave en un parque eólico marino, luego una mala elección de estos provocará en un proyecto fallido. Para la elección de aerogeneradores se atiende al recurso eólico del que vamos a disponer en la ubicación escogida. Esto hace que, aunque un aerogenerador sea mejor a priori no se adapte bien a las exigencias planteadas. Por tanto, para lograr la mejor opción la mejor forma de descubrirlo es comparar todos los aerogeneradores disponibles o por lo menos los más habituales. Como ya se ha ido mencionando en los anteriores apartados los aerogeneradores terrestres y offshore son prácticamente iguales, diferenciándoles las dimensiones y la potencia, siendo de mayor potencia los offshore puesto que el recurso en el mar es mayor y por tanto se busca aprovecharlo.

Por otra parte, a la hora de elegir el modelo del aerogenerador es conveniente prestar atención al peso, ya que como se ha visto en el anterior capítulo las plataformas flotantes van a ser la mejor opción para poder alejarnos lo máximo de la costa con la idea de generar el menor impacto a las reservas y zonas de especial protección ambiental.

En este apartado se van a comparar cinco de los modelos de aerogenerador más comunes como son Siemens Gamesa SG 14-222 DD, GE Haliade-X 12 MW, Vestas V236-15.0 MW, MHI Vestas V164-9.5 MW y Nordex N149/5.X, para luego escoger uno de ellos. El que mejor se ajuste a las exigencias de la ubicación.

- **Siemens Gamesa SG 14-222 DD:**

Las características generales del aerogenerador se recogen en la Tabla 9:

Modelo	<i>Siemens Gamesa SG 14-222 DD</i>
Fabricante	Siemens Gamesa
Potencia nominal (MW)	14
Diámetro del rotor(m)	222
Altura del buje (m)	110
Masa (t)	800
Densidad de potencia (w/m ²)	360
Velocidad mínima(m/s)	3
Velocidad nominal(m/s)	12
Velocidad máxima(m/s)	25
Número de palas	3
Tensión de salida (kV)	66
Altura de góndola(m)	115
Área de barrido(m ²)	39000
Tipo de limitación de potencia	Pitch
Longitud de la pala(m)	108
Factor de capacidad (%)	45

Tabla 9. Características generales del aerogenerador *Siemens Gamesa SG 14-222 DD* (Siemens Gamesa).

Este modelo de aerogenerador se encuentra instalado en *Sofia Offshore Wind Farm* el Mar del Norte de Reino Unido.



Figura 43. Aerogenerador *Siemens Gamesa SG 14-222 DD* (Siemens Gamesa).

- **GE Haliade-X 12 MW:**

Las características generales del aerogenerador se recogen en la Tabla 10:

Modelo	<i>GE Haliade-X 12 MW</i>
Fabricante	GE
Potencia nominal (MW)	12
Diámetro del rotor(m)	220
Altura del buje (m)	150
Masa (t)	720
Densidad de potencia (w/m ²)	315
Velocidad mínima(m/s)	3
Velocidad nominal(m/s)	11,5
Velocidad máxima(m/s)	25
Número de palas	3
Tensión de salida (kV)	66
Altura de góndola (m)	155
Área de barrido (m ²)	38000
Tipo de limitación de potencia	Pitch
Longitud de la pala(m)	107
Factor de capacidad (%)	46

Tabla 10.Características generales del aerogenerador *GE Haliade-X 12 MW* (General Electric).

Este modelo de aerogenerador se encuentra instalado en *Dogger Bank Wind Farm* el Mar del Norte de Reino Unido.



Figura 44. Parque eólico de *Dogger Bank Wind Farm* el Mar del Norte de Reino Unido (NS Energy, 2020)

- *Vestas V236-15.0 MW:*

Las características generales del aerogenerador se recogen en la Tabla 11:

Modelo	<i>Vestas V236-15.0 MW</i>
Fabricante	Vestas
Potencia nominal (MW)	15
Diámetro del rotor(m)	236
Altura del buje (m)	150
Masa (t)	860
Densidad de potencia (w/m ²)	340
Velocidad mínima(m/s)	3
Velocidad nominal(m/s)	12
Velocidad máxima(m/s)	31
Número de palas	3
Tensión de salida (kV)	66
Altura de góndola (m)	155
Área de barrido (m ²)	43500
Tipo de limitación de potencia	Pitch
Longitud de la pala(m)	115,5
Factor de capacidad (%)	47

Tabla 11. Características generales del aerogenerador *Vestas V236-15.0 MW* (Vestas, 2024).

Este modelo de aerogenerador se encuentra instalado en Thor Offshore Wind Farm el Mar del Norte de Dinamarca.

- *MHI Vestas V164-9.5 MW:*

Las características generales del aerogenerador se recogen en la Tabla 12:

Modelo	<i>MHI Vestas V164-9.5 MW</i>
Fabricante	MHI Vestas
Potencia nominal (MW)	9,5
Diámetro del rotor(m)	164
Altura del buje (m)	105
Masa (t)	580
Densidad de potencia (w/m ²)	280
Velocidad mínima(m/s)	3
Velocidad nominal(m/s)	11
Velocidad máxima(m/s)	25
Número de palas	3
Tensión de salida (kV)	66
Altura de góndola (m)	110
Área de barrido (m ²)	21124
Tipo de limitación de potencia	Pitch
Longitud de la pala(m)	80
Factor de capacidad (%)	44

Tabla 12. Características generales del aerogenerador *MHI Vestas V164-9.5 MW* (Vestas, 2024).

Este modelo de aerogenerador se encuentra instalado en Borssele III & IV el Mar del Norte de Países Bajos.

- *Nordex N149/5.X:*

Las características generales del aerogenerador se recogen en la Tabla 13:

Modelo	<i>Nordex N149/5.X</i>
Fabricante	Nordex
Potencia nominal (MW)	5,5
Diámetro del rotor(m)	149
Altura del buje (m)	105
Masa (t)	450
Densidad de potencia (w/m ²)	235
Velocidad mínima(m/s)	3
Velocidad nominal(m/s)	10,5
Velocidad máxima(m/s)	25
Número de palas	3
Tensión de salida (kV)	66
Altura de góndola (m)	110
Área de barrido (m ²)	17460
Tipo de limitación de potencia	Pitch

Longitud de la pala(m)	73
Factor de capacidad (%)	42

Tabla 13. Características generales del aerogenerador Nordex N149/5.X (Nordex, s.f.).

Una característica extra es su bajo nivel de ruido generado.

Este modelo de aerogenerador se encuentra instalado en Delta4000 Project en Alemania.



Figura 45. Aerogenerador Nordex N149/5.X (Nordex, s.f.).

Después de exponer las características más importantes de cinco de los aerogeneradores más usados se calcula el rendimiento de estos en las costas de Formentera con la idea de obtener un dato comparable particularizado para este caso concreto. Para ello se utilizará una velocidad media de 6m/s según la Figura 39 y la potencia nominal de cada aerogenerador. Además, se tendrá en cuenta el factor de capacidad de cada aerogenerador a la velocidad media esperada y el número total de horas de un año (8760h). Con todo ello y aplicando la fórmula que se adjunta más adelante, se calcula la energía anual generada esperada recogida en la tabala

$$E_{anual} = \text{factor de capacidad} * P_{nom} * \text{horas del año}$$

Modelo de aerogenerador	E_{anual} (MWh)
Siemens Gamesa SG 14-222 DD	42.966
GE Haliade-X 12 MW	37.843
Vestas V236-15.0 MW	48.654
MHI Vestas V164-9.5 MW	28.306
Nordex N149/5.X	15.436

Tabla 14. Resultados cálculo de energía generada anual de cada aerogenerador (elaboración propia).

Tras comparar las características generales y los resultados del cálculo de energía esperada anual se opta por usar el modelo de aerogenerador *Vestas V236-15.0 MW*.

Entre los puntos clave para su elección se encuentran su potencia nominal de 15 MW, una longitud de pala de 118 metros que ayuda maximizar la generación de energía con los recursos disponibles y su robustez y adaptabilidad.

SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PLATAFORMA

Tras elegir el modelo de aerogenerador que se va a usar toca elegir la plataforma sobre la que se va a instalar.

Como se ha visto en el capítulo 3 existen dos tipos de plataformas: fijas o flotantes. En caso como se busca alejarse de la costa lo máximo posible generar el menor impacto ambiental posible se van a descartar las plataformas fijas. Por tanto, solo quedan las plataformas flotantes que como también se ha tratado en el capítulo 3, existen cuatro tipos de plataformas flotantes cada una con sus ventajas e inconvenientes:

- **Barge o Barcaza.** Consiste en balsas como si fueran un barco. Son poco comunes en alta mar. Sus ventajas son la fácil instalación e idoneidad para bajas profundidades. Y entre sus debilidades se encuentra la baja estabilidad y gran susceptibilidad al oleaje y corrientes.
- **Semi-sumergible o semi-sumergible.** Se trata de estructuras de barras cilíndricas o paralelepípedos verticales unidos con vigas. Sus ventajas son la posibilidad de ser montado en tierra o en un dique para posteriormente trasladarlo con naves de arrastre convencionales y su menor coste de instalación, fondeo y anclaje. Mientras sus desventajas son su compleja fabricación debido a la soldadura de muchas juntas, lo que conlleva una gran necesidad de material, la necesidad de una cuidadosa instalación para logra la mejor flotabilidad y su mayor movimiento ante el oleaje en comparación a los *spar*.
- **Spar.** Esta tecnología consiste en un cilindro flotante con la mayor parte del peso en la zona más inferior. Entre sus ventajas destacan la simplicidad de su diseño, la baja cantidad de piezas móviles, su gran estabilidad ante el oleaje y el bajo coste de instalación del fondeo y anclaje en comparación con otras tecnologías. Sus puntos negativos son la necesidad de aguas profundas y su compleja instalación debido a la necesidad de embarcaciones de levantamiento pesado y de posicionamiento dinámico.
- **Tensioned Legs Platform (TLP) o mooring line stabilized.** Se trata de una estructura con tirantes de anclaje en tensión. Entre sus ventajas destacan la posibilidad de ser montado en tierra o en un dique, la baja cantidad de piezas móviles sin necesidad de lastre activo lo que le da ligereza y su alta estabilidad ante el oleaje. Por el contrario, sus desventajas son la necesidad de embarcaciones para su instalación, la falta de industria con experiencia, el riesgo de fallo de algún cable en su instalación lo que le da gran dificultad a su montaje y por tanto un mayor coste.

Después de analizar cada estructura con sus ventajas e inconvenientes se decide optar por una plataforma semi-sumergible. Puesto que ofrece un buen equilibrio entre estabilidad, flexibilidad de instalación a distintas profundidades y simplicidad de instalación.

SELECCIÓN DE LA FORMA DE AMARRE

Al usar plataformas flotantes es fundamental instalar un amarre seguro. Como se ha tratado anteriormente en el capítulo 3 hay al menos cuatro formas de amarre, que a modo de resumen y para facilitar la elección se van a comparar en la Tabla 15:

Tipo de amarre	Coste	Complejidad	Profundidad (m)	Impacto ambiental	Ventajas	Desventajas
Catenaria	Menor coste	Fácil de instalar	50-100	Movimiento de cadenas en el lecho marino	Absorbe fuerzas horizontales	Necesidad de mayor espacio horizontal
TLP	Costoso	Complejo	100-200	Anclaje profundo y mínimo movimiento	Gran estabilidad y mínimo movimiento vertical	Lecho marino firme
Semi-tensado	Medio	Media	100	Moderado	Equilibrio entre flexibilidad y estabilidad	Complejidad mayor que catenaria pura
Espiral	Alto	Alta	Varía	Se minimiza	Buena absorción de energía	Sin desarrollar mucho

Tabla 15. Comparativa entre los tipos de amarre (elaboración propia).

Después de comparar todos los tipos de amarre y dando un gran peso al impacto medioambiental se decide optar por un amarre semi-tensado, debido al equilibrio que mantienen entre estabilidad y flexibilidad y ser el de menor impacto en el medio marino a la vez de ser una tecnología con un uso extendido.

SELECCIÓN DE LA FORMA DE ANCLAJE

Tras seleccionar el modelo de aerogenerador, la plataforma y el tipo de amarre, solo queda elegir el tipo de anclaje de la estructura. En el capítulo 3 ya se expuso y desarrollo los tipos de anclaje

existentes, luego en este apartado se van a recoger y comparar en una tabla (Tabla 16) para facilitar la elección:

Tipo de anclaje	Impacto ambiental	Ventajas	Desventajas
Gravedad o peso muerto	Gran impacto en su colocación	Estabilidad y reutilizables	No aptos en suelos irregulares
Succión	Bajo impacto en suelos blandos	Rapidez	No apto en suelos duros
SEPLA	Pocas perturbaciones	Gran estabilidad	Equipos especializados
Arrastre	Gran impacto	Fácil desinstalación	No apto en suelos inestables
VLA	Menor que los de arrastre, pero significativo	Soporta fuerzas verticales	Impacto en el lecho marino considerables

Tabla 16. Comparativa entre los tipos de anclaje (elaboración propia).

La opción del anclaje SEPLA se presenta como la mejor opción por la gran estabilidad que aporta en suelos blandos como son los de Formentera, algo crucial en la instalación de parques offshore. Además, en el plano ambiental, es la que menor impacto originaría. Aunque es cierto que debido a ser una tecnología más novedosa y compleja requerirá de una mayor inversión y complejidad al necesitar equipos especializados para su instalación.

SELECCIÓN DEL TIPO DE CABLEADO

Una vez se genere la energía en los aerogeneradores, esta se tendrá que evacuar a la isla para su consumo. Para ello es necesario un sistema eléctrico con claves resistentes a las condiciones marinas, con cambios de temperatura. Además, de la propia inducción del transporte de energía. Se utilizará un cable HVAC, en lugar de un MVAC porque a pesar de ser más costosos y complejos de instalar, tienen menores pérdidas a largas distancias. De todos los cables posibles se va a elegir el *Nexans XLPE HVAC*. Un producto de gran calidad que está siendo instalado en grandes infraestructuras como *Hadsselfjord* (Noruega), donde se está sustituyendo el anterior cableado por este cruzando los fiordos y en el proyecto del cable submarino más largo del mundo en Martin Linge en Noruega para el cliente Equinor.

En la siguiente tabla (Tabla 17) se recogen las especificaciones generales de este cable:

Capacitancia	0.224 $\mu\text{F}/\text{km}$ - 0.279 $\mu\text{F}/\text{km}$
Resistencia en AC (90°C)	0.1 Ω/km
Resistencia en CC (20°C)	0.015 Ω/km
Núcleo	Conductores de cobre o aluminio, aislados con XLPE
Diámetro	150 mm
Peso en aire/agua	En aire: 30 kg/m y en agua: 70-80% del peso en aire
Frecuencia	50 Hz o 60 Hz
Sección del Conductor	240 mm ² - 2500 mm ²

Tabla 17. Especificaciones del cable Nexans XLPE HVAC (Nexans, 2024).



Design:

Aufbau:

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1 Conductor (Al or Cu)
Leiter (Al oder Cu) 2 Inner semi-conducting layer
Innere Leitschicht 3 XLPE insulation
VPE-Isolierung 4 Outer semi-conducting layer
Äußere Leitschicht 5 Swellable tape
Quellvlies 6 Lead sheath
Bleimantel | <ul style="list-style-type: none"> 7 PE overshath
PE-Außenmantel 8 Fibre optic cable
Lichtwellenleiterkabel 9 Filler profiles
Profiltrensen 10 Bedding (PP)
Polsterlage (PP) 11 Armouring
Armierung 12 Outer serving (PP)
Außenschutz (PP) |
|---|--|

Figura 46. Esquema del cable Nexans XLPE HVAC (Nexans, 2024)

Puesto que el cable está anclado a la plataforma, estará sometido a los mismos desplazamientos que la plataforma. Luego se usan boyas submarinas para evitar esa tensión. Como muestra en la Figura 47.

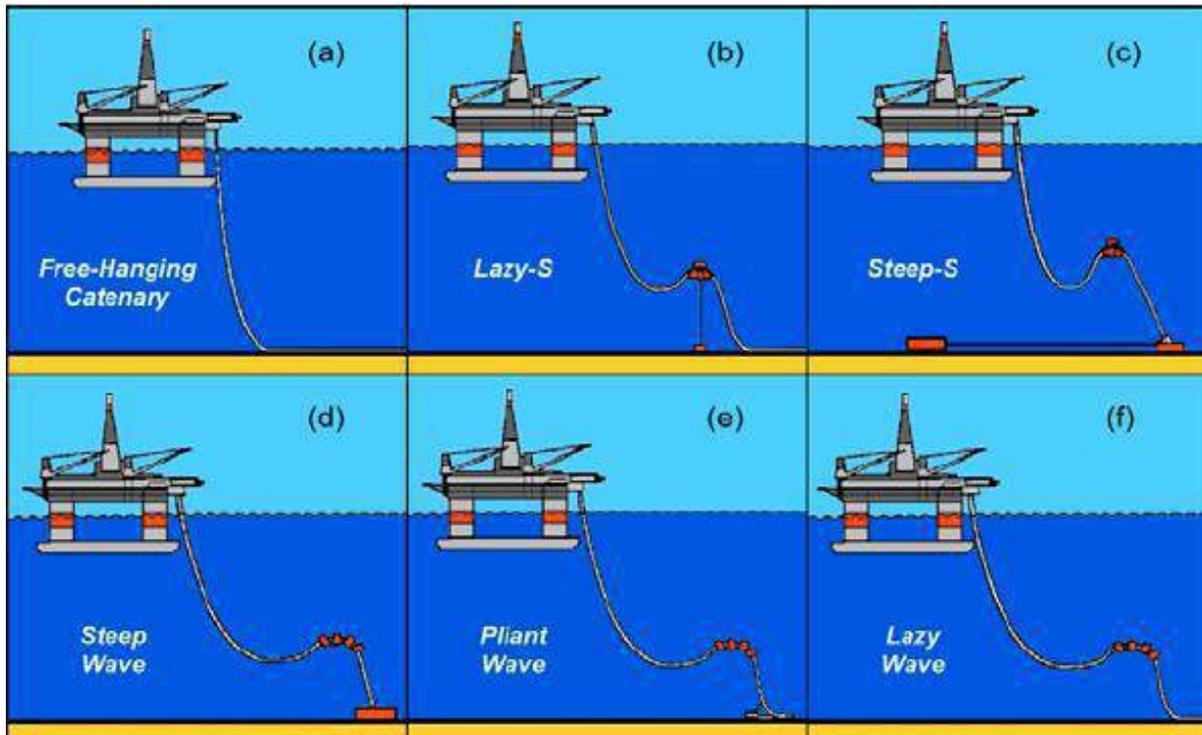


Figura 47. Tipos de cableado en plataformas offshore (Research Gate, 2024).

Se escoge el modelo *free hanging catenary*, para evitar que el cable choque o se enrede con los amarres. Luego se calcula el peso del cable en función de la longitud $0,8 \cdot 30 \text{ kg/m} = 24 \text{ kg/m}$. este es el peso que se debe vencer con las boyas submarinas.

CAPÍTULO 7. DISPOSICIÓN Y DIMENSIONAMIENTO

ORIENTACIÓN

Con la ayuda de la rosa de los vientos se observa cual es la dirección predominante del viento. En este caso hay dos opciones Este y suroeste. Se escogerá la dirección del suroeste por tener un viento algo mejor.

Rosa de vientos a la altura seleccionada

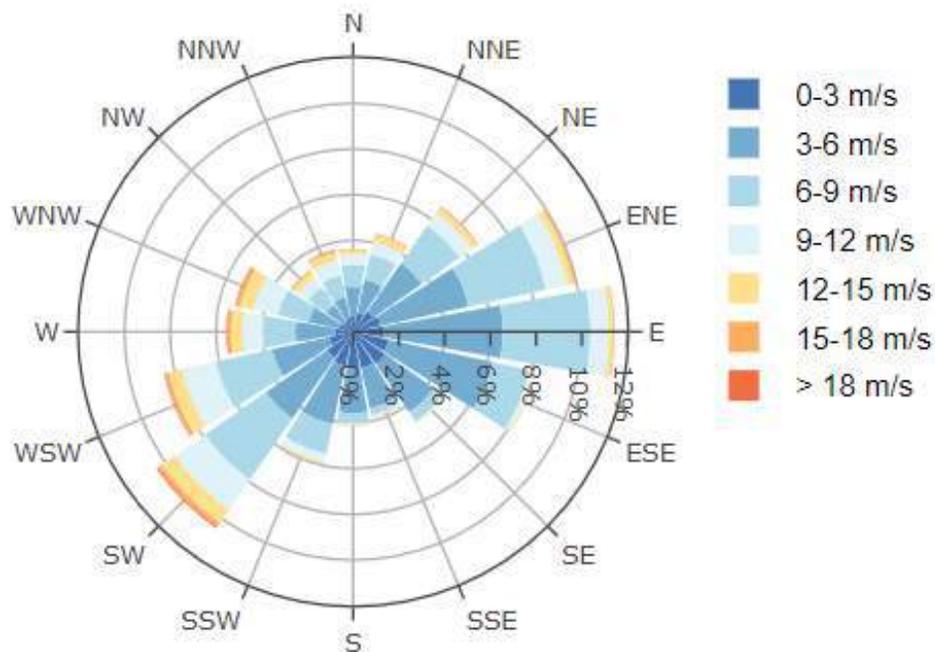


Figura 48. Rosa de los vientos de la ubicación seleccionada (Mapa cólico ibérico, 2024).

EFFECTO ESTELA

Para maximizar la energía obtenida del viento es fundamental orientar las turbinas en la dirección predominante del viento. Pero además de este detalle es preciso atender al efecto estela, que se produce una vez el viento atraviesa la turbina y pierde energía, ya que esta es absorbida por el rotor.

Todos los aerogeneradores dejan de tras de sí y en dirección favorable al viento una cola de aire turbulenta y ralentizada con respecto al que entra en las palas del aerogenerador.

En los parques eólicos se evita que el viento que esa ola de viento no entre en una turbina aguas abajo porque reduciría así el rendimiento. Para ello se colocan los aerogeneradores con una distancia suficiente para que el viento recupere sus condiciones óptimas.

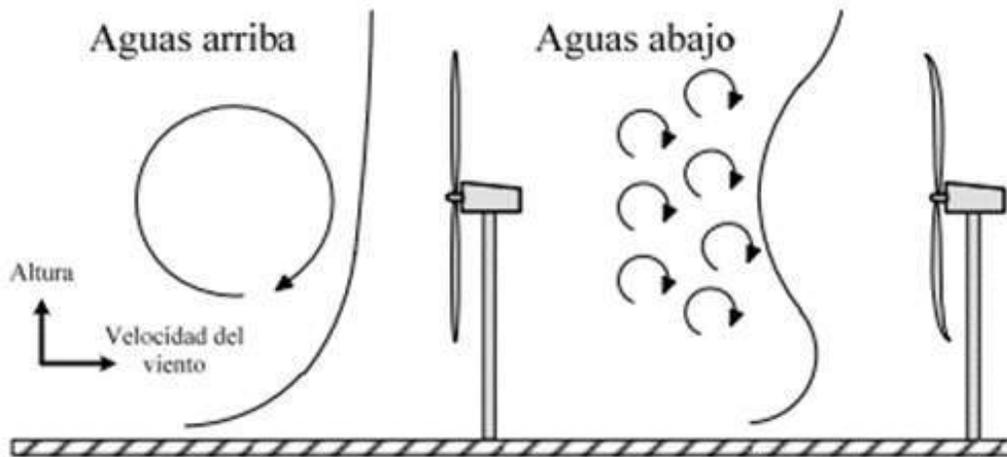


Figura 49. Efecto estela (Vector renewables, 2023).

Desde el punto de vista técnico lo mejor es separar las turbinas lo máximo posible, pero en el plano económico la separación es penalizada pues o bien se requiere más terreno o bien el cableado es más costoso.

DISPOSICIÓN

La distancia entre aerogeneradores es menor en la dirección perpendicular al viento que en la dirección a favor. De forma común la distancia entre turbinas de la misma fila (perpendicular al viento) se sitúa entre tres y cinco diámetros, y de entre cinco y nueve en la dirección del viento. Es habitual colocarlo a siete diámetros en dirección al viento

Existen cinco disposiciones típicas: lineal con filas y columnas paralelas, lineal al tresbolillo por filas, lineal al tresbolillo por columnas, lineal al tresbolillo por filas y columnas, circular y circular al tresbolillo.

En este caso como se van a colocar cinco generadores para evitar no superar los 50 MW de potencia instalada y así facilitar trámites legales se colocarán en final uno seguido de otro con una distancia de cuatro diámetros.

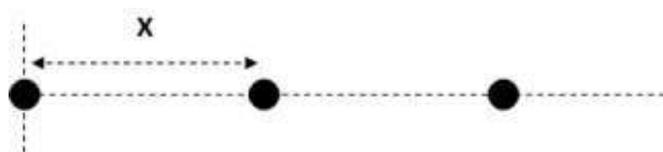


Figura 50. Disposición de los aerogeneradores (elaboración propia).

ELECCIÓN FINAL

La descripción final del parque eólico offshore es:

- Modelo de aerogenerador: Vestas V236-15.0 MW
- Plataforma flotante: semi-sumergible
- Amarre: semi-tensado
- Anclaje: SEPLA
- Cableado: *Nexans XLPE HVAC*

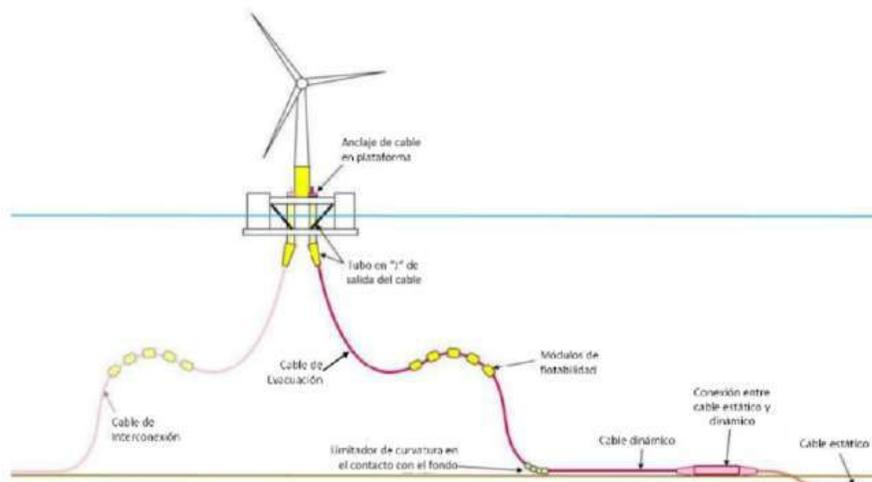


Figura 51. Esquema de un aerogenerador con plataforma semi-sumergible (Ecoavant, 2021).

CAPÍTULO 8. POTENCIA, ENERGÍA Y RENDIMIENTO DEL PARQUE

Para poder estudiar la viabilidad económica y técnica es necesario conocer la capacidad de generación del parque estudiado. Por lo tanto, es necesario hacer una predicción de los resultados para más tarde poder tomar una decisión.

DATOS DEL VIENTO

Como se ha ido comentando a lo largo de toda la memoria el viento es el recurso energético, luego es preciso conocer su comportamiento en la zona escogida. Para ello se utilizarán datos del mapa eólico ibérico.

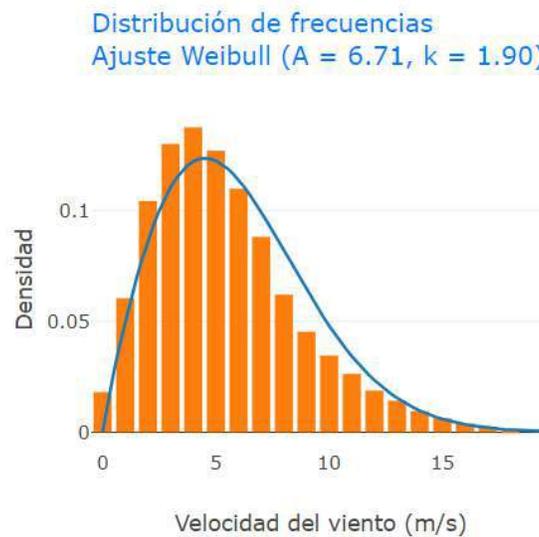


Figura 52. Ajuste de Weibull de la velocidad del viento (Mapa eólico ibérico, 2024).

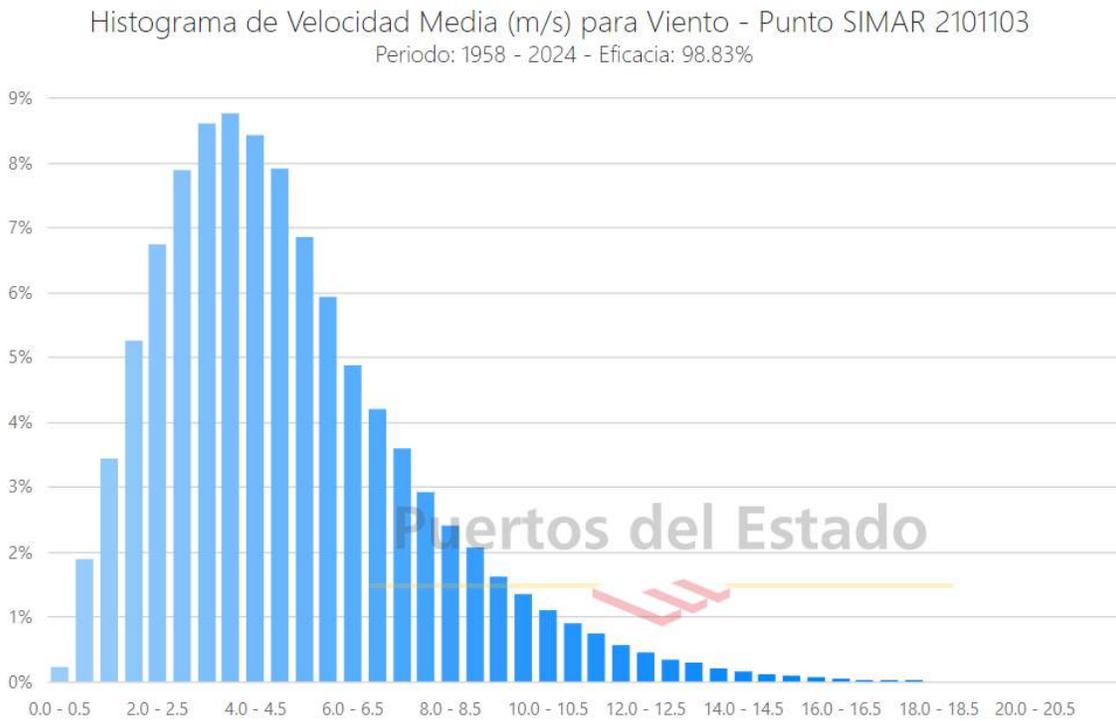


Figura 53. Histograma de la velocidad media del viento (m/s) en SIMAR 2101103 (Puertos del Estado, 2024).

Observando las anteriores gráficas se puede extraer información sobre la velocidad del viento útil para el cálculo de la potencia, ya sea mediante cálculo o mediante aproximaciones.

CÁLCULO DE POTENCIA Y ENERGÍA

A partir de los datos de la velocidad del aire de la Figura 53, que son de un punto cercano al emplazamiento escogido y aplicando la fórmula de la Figura 54, tomando el valor de densidad de aire en el mar de $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ y el valor de $C_p = 47\%$ como así se recoge en las especificaciones del aerogenerador escogido (Tabla 11), se calcula la potencia y la energía para cada velocidad del viento como se recoge en la Tabla 18.

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot (\pi r^2) \cdot v^3$$

Figura 54. Fórmula de cálculo de la potencia.

Velocidad del viento (m/s)	Potencia (MW)	Frecuencia (%)	Horas al año (h)	Energía (MWh)
0,5	0	0,23	20	0
1	0	1,89	166	0
1,5	0	3,44	301	0
2	0	5,46	478	0
2,5	0	6,73	589	0
3	0	7,87	689	0
3,5	0,54	8,59	752	406
4	0,81	8,75	766	617
4,5	1,15	8,42	737	845
5	1,57	7,9	692	1.088
5,5	2,09	6,84	599	1.254
6	2,72	5,93	520	1.412
6,5	3,46	4,87	427	1.474
7	4,32	4,21	369	1.592
7,5	5,31	3,59	314	1.669
8	6,44	2,93	257	1.654
8,5	7,73	2,4	210	1.625
9	9,18	2,07	181	1.663
9,5	10,79	1,62	141	1.531
10	12,59	1,35	118	1.488
10,5	14,57	1,1	96	1.403
11	15	0,9	79	1.182
11,5	15	0,73	64	959
12	15	0,56	49	735
12,5	15	0,45	39	591
13	15	0,34	30	446
13,5	15	0,29	25	381
14	15	0,2	18	262
14,5	15	0,16	14	210
15	15	0,11	10	144
15,5	15	0,09	8	118
16	15	0,06	5	78
16,5	15	0,04	3	52
17	15	0,01	1	13
17,5	15	0,01	1	13
18	15	0,01	1	13

18,5	15	0	0	0
19	15	0	0	0
19,5	15	0	0	0
20	15	0	0	0
20,5	15	0	0	0
Total:				24.932

Tabla 18. Resultados de potencia (MW) y energía (MWh) del aerogenerador (elaboración propia).

Se estiman unas pérdidas del 15% por pérdidas como indica IDEA. Estas pérdidas se pueden deber a disponibilidad, por las paradas provocadas por averías o vientos excesivos; pérdidas de transformación y transporte al elevar la tensión para transportarla. Además, el rendimiento del parque irá disminuyendo, debido al desgaste. Teniendo esto en cuenta y sabiendo que se instalarán tres aerogeneradores se obtiene la energía bruta y neta de cada aerogenerador y del conjunto, en la siguiente tabla (Tabla 19).

Energía unitaria bruta (MWh)	24.931
Energía unitaria neta (MWh)	18.698
Energía total bruta (MWh)	74.795
Energía total neta (MWh)	56.096

Tabla 19. Resultados de energía del parque (elaboración propia).

Por último, se calcula el potencial eólico de la planta importante para valorar viabilidad y el rendimiento. Para valorar este potencial se calcula el factor de carga definido como energía obtenida (E) entre la energía esperada (E_o):

$$C_p = \frac{E}{E_o} = \frac{56096,8286}{3 * 15 * 365 * 24} = 0,14$$

CURVA DE ENERGÍA EXTRAÍDA

En los catálogos de aerogeneradores siempre se adjunta siempre se adjunta una curva de potencia o de producción anual como en este caso (Figura 55). A partir de este dato se puede obtener la energía esperada para la velocidad media del viento media que se espera.

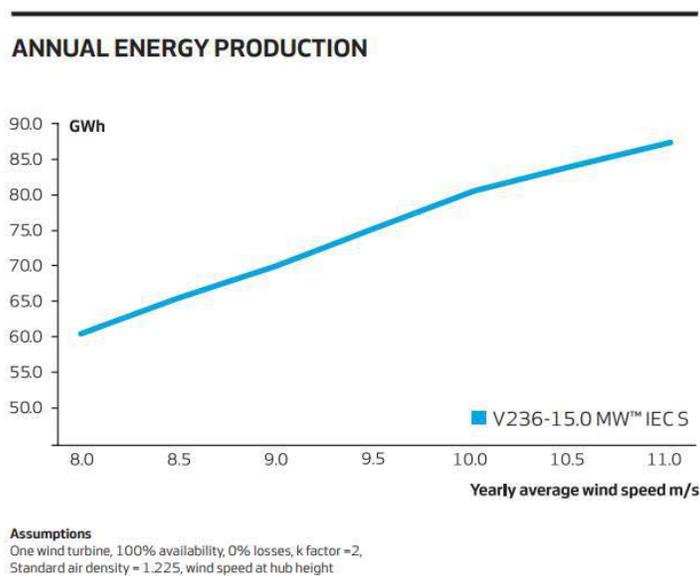


Figura 55. Curva de producción anual del aerogenerador Vestas V236-15.0 MW (Vestas, 2024).

Esta gráfica como valor mínimo de velocidad tiene 8m/s y la ubicación tiene una velocidad media de entre 4 m/s y 5m/s, luego se debe extrapolar para obtener la producción a esa velocidad. El valor de energía producida es de 24,8 GWh bruto, considerando las limitaciones solo del aerogenerador, luego si se tienen en cuenta las pérdidas del 15%, se obtiene un menor valor como recoge la Tabla 20:

Energía unitaria bruta (GWh)	24
Energía unitaria neta (GWh)	18
Energía total bruta (GWh)	74
Energía total neta (GWh)	55

Tabla 20. Resultados de producción del aerogenerador según la curva (elaboración propia).

Se calcula el potencial eólico de la planta importante para valorar viabilidad y el rendimiento. Para valorar este potencial se calcula el factor de carga definido como energía obtenida (E) entre la energía esperada (Eo):

$$C_p = \frac{E}{E_o} = \frac{55,8 \text{ GWh}}{3 * 15 * 365 * 24} = 0,14$$

CAPÍTULO 9. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se estudiará la viabilidad económica del parque eólico, a través del estudio de los costes asociados a la generación a lo largo de todo su ciclo de vida.

Existe multitud de parámetros a tener en cuenta a la hora de elegir la forma óptima de obtener energía desde los acuerdos nacionales, ambientales, impacto social y cada uno tienen una importancia que puede ser discutible, pero lo que jamás es discutible o interpretable es construir un parque eólico que no es rentable. Por eso es tan importante y a la vez tan complejo calcular los costes y ganancias, ya que hay muchos factores en juego y cada proyecto tienen sus particularidades. El coste de la energía producida o LCOE va a ser decisivo para tomar decisiones a cerca de la construcción o no del proyecto. Para evaluar todo el proyecto se tendrá en cuenta, tanto el coste inicial como las ganancias a lo largo de todo su ciclo de vida, dividido en: desarrollo y obtención de permisos, producción y compra de equipos, instalación y puesta en marcha, operación y mantenimiento y desmantelamiento.

El análisis económico se dividirá en cuatro puntos costes de inversión, costes de mantenimiento y operación, ingresos y amortización.

COSTES DE INVERSIÓN

Los costes de inversión a su vez se desglosan en los costes derivados de los estudios previos y obtención de permisos, la compra de los equipos, el coste de la construcción.

Costes de estudios previos y obtención de permisos

Antes de iniciar la instalación del parque es preciso hacer un estudio previo sobre la viabilidad de este y obtener los permisos necesarios. Esto incluye informes, la compra de software, gastos de desplazamientos y tasas como así lo recoge la tabla

Gastos	Rango de costes (€)
Investigación y desarrollo para estudios de viabilidad personalizados	8.500 – 42.500
Equipo y software para evaluaciones técnicas y modelado	4.250 – 17.000
Costo de contratación de consultores especializados	42.500 – 127.500
Permiso y cumplimiento regulatorio	8.500 – 42.500
Estudios de impacto ambiental	17.000 – 85.000
Informe de factibilidad redacción y publicación	4250 - 25500
Seguro y honorarios legales	8.500 – 42.500

Gastos de viaje para visitas al sitio y reuniones	4.250 – 17.000
Marketing y publicidad para adquirir nuevos clientes	4.250 – 25.500
Total	108.800-425.000

Tabla 21. Coste de trabajos previos (elaboración propia).

Costes de equipos

Una vez se ha estudiado que es viable a nivel técnico y ambiental la instalación del parque es necesario comprar todos los equipos y materiales. A continuación, se recogen de forma aproximada los costes de los equipos que son necesarios.

Equipo	Unidades	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Aerogenerador (Vestas V236-15.0 MW)	3	15.000.000	45.000.000
Plataforma (semi-sumergible)	3	900.000	2.700.000
Anclaje (SEPLA)	3	8.000	24.000
Amarre (semi-tensado)	1.500	20	30.000
Subestación	1	8.125.000	8.125.000
Cable <i>Nexans XLPE HVAC</i>	5.000	200	1.000.000
Total			56.879.000

Tabla 22. Coste de los equipos (elaboración propia).

Costes de transporte

Una los equipos necesarios deben ser transportados a la ubicación del mar para su posterior instalación y eso tiene un coste que queda recogido en la siguiente tabla (Tabla 23):

Equipo	Unidades	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Aerogenerador (Vestas V236-15.0 MW)	3	300.000	900.000
Plataforma (semi-sumergible)	3	100.000	300.000
Anclaje (SEPLA)	3	4.000	12.000
Amarre (semi-tensado)	1.500	2.000	2.000
Subestación	1	35.000	35.000
Cable <i>Nexans XLPE HVAC</i>	5	1.000	5.000
Total			1.254.000

Tabla 23. Coste de los equipos (elaboración propia).

Costes de instalación

Los equipos deben ser instalados y eso tiene un coste que se recoge en la Tabla 24

Proceso	Coste estimado (M€)
Instalación de Plataformas Flotantes	4,25
Instalación de Aerogeneradores	7,09
Instalación del Sistema de Amarre y Anclaje	2
Tendido y Conexión del Cableado Submarino	2
Comisionado y Pruebas	1,42
Total	16.760.000

Tabla 24. Coste de los equipos (elaboración propia).

Coste total inicial de inversión

Se recogen todos los costes iniciales que se deben invertir para el estudio y construcción del parque:

Proceso	Coste estimado (M€)
Estudios previos	425.000
Equipos	56.879.000
Transporte	1.254.000
Instalación	16.760.000
Total	75.318.000

Tabla 25. Costes totales iniciales de inversión (elaboración propia).

Es un coste bastante alto todo lo relacionado con el transporte y la instalación, esto es debido a la falta de desarrollo en el sector en cuanto a esta tecnología. Estos costes se espera que se reduzcan de aquí a un tiempo con el n I+D+I y los nuevos avances tecnológicos, que permitirán una mayor competitividad.

Costes de mantenimiento y operación

El coste de mantenimiento y operación (O&M) de un parque eólico offshore comprende una amplia serie de actividades y servicios:

- **Mantenimiento preventivo:** inspección de la instalación, limpieza y sustitución de piezas antes de fallar.
- **Mantenimiento correctivo:** reparación de piezas que se han averiado.
- **Monitorización y supervisión:** sistemas para monitorizar y controlar.
- **Operaciones marítimas:** todo gasto de transporte de operarios hasta el área de la instalación.
- **Seguros:** pólizas y seguros contratadas ante posibles daños.
- **Costes administrativos:** toda la parte legal.

Todos estos costes se estiman en entre el 2 y 3 % de la inversión inicial en este caso entre 2,18 M€ y 3,27 M€.

INGRESOS ANUALES

Resulta complejo estimar unos ingresos exactos, pero es posible hacer unos aproximado que permita hacer una idea de la situación. Para ello, se parte de una producción de 55.8 GWh como se ha calculado anteriormente y de un precio en el mercado de 0.1 €/kWh, luego los ingresos brutos serían de 5,580,000 €. A esto se le restaría los costes de mantenimiento que en el caso más pesimistas son de 3.27M€.

$$Ingresos_{brutos\ anuales} = 55.8\text{ GWh} * 0.1 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 5.580.000\ \text{€}$$

$$Ingresos_{netos\ anuales} = 5580000 - 3270000 = 2.310.000\ \text{€}$$

Quedan unos ingresos antes de impuestos de 2.3 M€, un valor bastante alto a priori pero quizá no suficiente para ser considerado como una buen inversión teniendo en cuenta los altos costes de inversión inicial.

AMORTIZACIÓN

Tras calcular todos los costes de inversión inicial y de mantenimiento y operación y los posibles ingresos se debe recoger todos esos valores y para una vida útil estimada del parque offshore de 30 años se calcula la amortización. En la Tabla 26 se recoge la amortización de los cinco primeros años para hacer una idea general.

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Costes O&M		-2.180.000 €	-2.180.000 €	-2.180.000 €	-2.180.000 €	-2.180.000 €
Ingresos		5.580.000 €	5.580.000 €	5.580.000 €	5.580.000 €	5.580.000 €
Amortización		-2.510.600 €	-2.510.600 €	-2.510.600 €	-2.510.600 €	-2.510.600 €
Beneficios		889.400 €	889.400,00 €	889.400,00 €	889.400,00 €	889.400,00 €
FONDO DE CAJA OPERATIVO		3.400.000 €	3.400.000 €	3.400.000 €	3.400.000 €	3.400.000 €
Inversiones	-75.318.000 €					
FONDO DE INVERSIONES	-75.318.000 €					
FONDO TOTAL DE CAJA	-75.318.000 €	3.400.000 €	3.400.000 €	3.400.000 €	3.400.000 €	3.400.000 €
Factor 10%	1 €	1,10 €	1,21 €	1,33 €	1,46 €	1,61 €
Sumandos del VAN	-75.318.000 €	3.090.909 €	2.809.917 €	2.554.470 €	2.322.245 €	2.111.132 €

Tabla 26. Amortización de los cinco primeros años de vida útil del parque eólico (elaboración propia).

Únicamente con los datos de gastos, ingresos y amortización no se puede valorar si una instalación es rentable o no. Para poder valorarlo lo más recomendable es obtener algún otro parámetro como por ejemplo el VAN.

Para este proyecto se obtiene un VAN de -43.266.490 €, luego no se presenta como un proyecto sostenible a nivel económico y por tanto no tiene posibilidades de ser llevado a cabo.

CAPÍTULO 10. ANÁLISIS SOCIAL

ALINEACIÓN CON LOS ODS

Este proyecto no se desarrolla de espaldas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y de entre los diecisiete recogidos por las Naciones Unidas este trabajo se identifica estrechamente con hasta tres como es el séptimo “Energía asequible y no contaminante”, el octavo “Trabajo decente y crecimiento económico”, el noveno “Industria, innovación e infraestructuras”, el onceavo “Ciudades y comunidades sostenibles” y el treceavo “Acción por el clima” (Naciones Unidas , 2015). Este proyecto es una clara apuesta por la transición energética hacia una producción de energía limpia y el desarrollo de infraestructuras e innovación que busca reducir el precio de la energía a la vez que el impacto ambiental dando la oportunidad a la isla de Formentera de ser un espacio sostenible donde se puedan seguir desarrollando proyectos innovadores.



Figura 56. ODS (Naciones Unidas, 2024).

IMPACTO LOCAL

La construcción de un parque eólico siempre es un algo controvertido, pues ocupa un gran espacio y supone un impacto visual que nunca es bien recibido y por ese motivo se buscan ubicaciones alejadas o poco visibles. Esta es quizá uno de los mayores puntos negativos de las energías renovables su impacto urbanístico, ya que aprovechan recursos naturales y se deben ubicar en zonas naturales.

Cada vez se busca depender más de estas energías renovables y por lo tanto la potencia instalada de estas es mayor lo que supone un mayor impacto especialmente para las localidades que los albergan. Pero si se quieren energías renovables se debe aceptar este inconveniente y tratar de

asimilarlo de la mejor manera de la misma forma que se han integrado en el paisaje carreteras, puentes, tendidos eléctricos y vías de tren. En el caso de Formentera es más difícil si cabe esta asimilación pues se posiciona como un destino natural y el parque puede romper con esa armonía, pero también quiere mostrarse como una sociedad verde y para serlo y solo decirlo se debe abandonar los combustibles fósiles por eso, aunque sea una decisión difícil es preciso plantearse sacrificar algo del paisaje para logara ser más sostenibles como ya se sacrifica el paisaje de algunas playas con el amarre de barcos.



Figura 57. Playa de Formentera con barcos al fondo(elaboración propia).

CAPÍTULO 11. CONCLUSIONES

DISEÑO FINAL

En esta tabla (Tabla 27) se recogen todas las características del parque eólico offshore propuesto para la zona de Formentera:

Ubicación	Sur de Formentera (Figura 58)
Potencia	45 MW
Orientación	Suroeste
Nº de aerogeneradores	3
Modelo de aerogeneradores	Vestas V236-15.0 MW
Distancia entre aerogeneradores	4*diámetros = 944 m
Plataforma flotante	semi-sumergible
Amarre	semi-tensado
Anclaje	SEPLA
Cable	Nexans XLPE HVAC
Longitud de conexionado	4,44 km

Tabla 27. Resumen del diseño final de la planta eólica offshore (elaboración propia).

Además, se adjunta una imagen con el esquema de los aerogeneradores ubicados en las costas de Formentera:

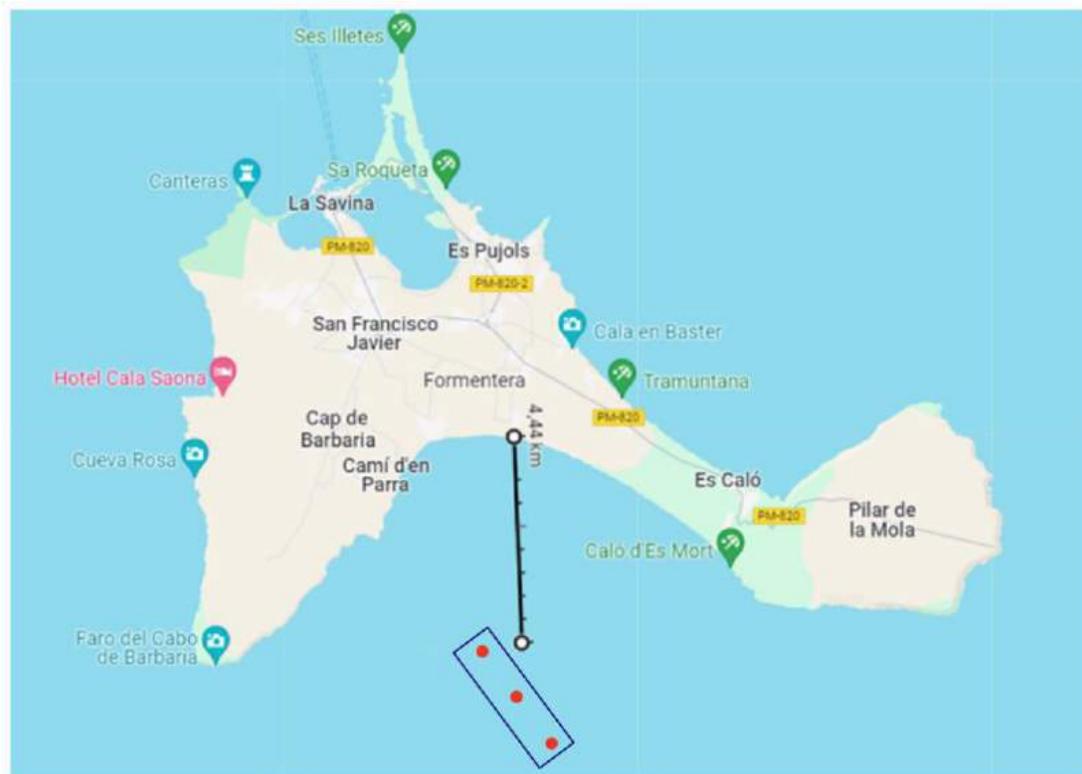


Figura 58. Disposición del parque eólico offshore (elaboración propia).

CONCLUSIONES FINALES

El presente trabajo de fin de grado ha llevado a cabo una evaluación exhaustiva sobre la viabilidad técnica, económica y ambiental de la instalación de un parque eólico offshore en la isla de Formentera. A continuación, se presentan las conclusiones detalladas derivadas de esta evaluación.

La evaluación técnica del proyecto ha confirmado que la instalación de un parque eólico offshore en las costas de Formentera es plenamente viable. Se ha llevado a cabo un análisis minucioso de los recursos eólicos disponibles, incluyendo estudios sobre la velocidad y dirección del viento, así como el comportamiento del lecho marino. Estos estudios han permitido identificar ubicaciones óptimas para la instalación de aerogeneradores, maximizando la eficiencia en la generación de energía. Además, se han seleccionado los equipos como son los aerogeneradores, plataformas, anclajes y cableado.

Sin embargo, a pesar de ser viable desde el punto de vista técnico en su parte más teórica, desde un punto de vista práctico no es viable puesto que el coeficiente de carga se sitúa en un 14%, muy por debajo de valores razonables como son un a partir de un 30%.

El parque cumpliría con las exigencias ambientales locales y se presenta como altamente beneficioso para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en línea con los ODS de sostenibilidad y lucha contra el cambio climático. Aunque, es cierto que tendría un impacto durante la instalación y operación del parque, se ha buscado que los sistemas de construcción tengan el menor impacto posible.

A pesar de la viabilidad técnica y los beneficios ambientales, el análisis económico revela que el proyecto enfrenta serios desafíos en términos de viabilidad financiera. Los costes iniciales de inversión para la construcción del parque eólico son extremadamente altos. Estos incluyen la fabricación y transporte de componentes de gran tamaño, la construcción de estructuras de anclaje seguras y el despliegue de tecnologías avanzadas de transmisión de energía.

Además, los gastos de mantenimiento a largo plazo en un entorno marino, caracterizado por la corrosión y las difíciles condiciones operativas, son considerablemente elevados. Esto provoca que la amortización no se pueda llevar a cabo en los treinta años de vida útil que se espera tenga el parque y por tanto que no sea razonable desde un punto de vista económico su construcción.

Desde una perspectiva social, el proyecto se encuentra alineado con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, incluyendo energía asequible y no contaminante, trabajo decente y crecimiento económico, industria, innovación e infraestructuras, y acción por el clima. Al proporcionar una fuente de energía limpia y sostenible, el parque eólico offshore apoyará los esfuerzos de la isla para reducir su dependencia de combustibles fósiles y avanzar hacia un futuro más sostenible.

En conclusión, el parque eólico en las costas de Formentera no es viable a nivel económico, arrojando unos datos bastante insostenibles. Esto nos plantea el desafío de obtener energía de fuentes renovables que sean respetuosas con el medio ambiente a la vez de que sean viables a nivel económico. Algo que no se puede compaginar en todas las ubicaciones como es el caso estudiado en este trabajo que debido a los altos costes de transporte y fabricación el proyecto no es viable. Luego con este trabajo se puede poner en relieve la falta de desarrollo de este tipo de industria y la gran dificultad a la que se enfrenta la sociedad ante la búsqueda de la transición ecológica que presenta grandes desafíos en áreas con particularidades como las islas.

Referencias

appa renovables. (10 de junio de 2024). *appa renovables*. Obtenido de <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-y-empleo/>

Asociación Empresarial Eólica. (24 de mayo de 2024). Obtenido de AEE: <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>

BOE. (29 de julio de 1988). *num.181 de 29/07/1988*.

BOE. (20 de julio de 2007). *BOE-A-2007-14657*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-14657>

BOE. (11 de diciembre de 2013). *BOE-A-2013-12913*.

BOE. (26 de diciembre de 2013). *BOE-A-2013-13645*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-13645>

Construction physics. (s.f.). Obtenido de <https://www.construction-physics.com/p/why-did-we-wait-so-long-for-wind-c51>

Corporativo. (s.f.). *Iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore/construccion-parques-eolicos-marinos>

Drilling Formulas. (s.f.). Obtenido de <https://www.drillingformulas.com/suction-anchor-calculation/>

Ecoavant. (25 de junio de 2021). *Ecoavant*. Obtenido de https://www.ecoavant.com/contaminacion/riesgos-energia-eolica-ecosistemas-marinos_6671_102.html

EMODnet. (s.f.). *EMODnet*. Obtenido de <https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/#!/>

Energía, D. G. (15 de julio de 2021). *Comisión europea*. Obtenido de https://commission.europa.eu/news/focus-eu-islands-and-clean-energy-transition-2021-07-15_es#El%20Abastecimiento%20Energ%C3%A9tico:%20Un%20Desaf%C3%ADo%20Y%20Una%20Oportunidad

ESRU. (2 de julio de 2024). *ESRU*. Obtenido de Tipos de amarre: https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/11-12/MORE/mooring/types.html

Ferrer, I. V. (5 de julio de 2020). Formentera cubrió en junio el 10,75% de la demanda eléctrica con sus placas solares. *Periódico de Ibiza y Formentera*.

Formenteraavu. (5 de octubre de 2021). Obtenido de <https://formenteraavui.com/2021/10/05/formentera-bonificara-50-del-ibi-los-hogares-energias-provenientes-del-sol/>

Formentera define el camino hacia la transición energética. (5 de junio de 2020). *Diario de Ibiza*.

Formentera define el camino hacia la transición energética. (5 de junio de 2020). *Diario de Ibiza*.

Freepik. (s.f.). Obtenido de <https://www.freepik.es/fotos/seguridad>

General Electric. (s.f.). *General Electric*. Obtenido de <https://www.gevernova.com/wind-power/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>

Geotermia online. (14 de febrero de 2015). *Geotermiaonline.com*. Obtenido de <https://geotermiaonline.com/4395/energias-renovables/>

Gobierno de España. (s.f.). *Red natura 2000*. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/rednatura2000_descargas.html

Gobierno de las Islas baleares. (s.f.). *Caib*. Obtenido de Plano y zonificación : <https://www.caib.es/sites/reservesmarines/f/318068>

Gobierno de las Islas Baleares. (s.f.). *Caib*. Obtenido de Las reservas marinas en las Islas Baleares: https://www.caib.es/sites/reservesmarines/es/las_reservas_marinas_en_las_illes_balears-850/

- Google. (17 de mayo de 2024). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.es/maps>
- Iberdrola. (6 de junio de 2024). *iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore/construccion-parques-eolicos-marinos>
- Iberdrola. (28 de mayo de 2024). *Iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore>
- Iberdrola. (s.f.). *Cimentaciones de aerogeneradores*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/cimentaciones-aerogeneradores-marinos>
- Iberdrola. (s.f.). *Eólica marina flotante*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/innovacion/eolica-marina-flotante>
- Iberdrola. (s.f.). *Iberdrola*. Obtenido de ¿Cómo se sustentan los aerogeneradores en el mar?: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/cimentaciones-aerogeneradores-marinos>
- JJADMIN. (29 de noviembre de 2020). *System Network*. Obtenido de Qué es un aerogenerador y cómo funciona: <https://grupo-system.com/que-es-un-aerogenerador-y-como-funciona/>
- Mapa eólico ibérico. (29 de junio de 2024). *Mapa eólico ibérico*. Obtenido de <https://www.mapaeolicoiberico.com/map;latitude=40.91057;longitude=-1.43808;altura=100;dato=micro>
- Marine traffic. (s.f.). Obtenido de <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:-6.6/centery:41.4/zoom:7>
- MDPI. (4 de abril de 2021). *MDPI*. Obtenido de Estructuras de soporte de hormigón para turbinas eólicas marinas: estado actual, desafíos y tendencias futuras: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/1995>
- Naciones Unidas . (2015). *ODS*. Obtenido de <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- Naciones Unidas. (23 de junio de 2024). *Naciones Unidas*. Obtenido de <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- Nautic expo. (s.f.). Obtenido de <https://www.nauticexpo.es/prod/vryhof/product-68605-504988.html>
- Nexans. (2 de julio de 2024). *Nexans*. Obtenido de <https://www.nexans.es/es/>
- Nordex. (s.f.). *Nordex*. Obtenido de <https://www.nordex-online.com/es/product/n149-5-x/>
- NS Energy. (3 de febrero de 2020). Parques eólicos de Dogger Bank. *NS Energy*.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). (2023). *Resumen del año 2022: Recursos potenciales y demanda de energía renovables mundial impulsados por el clima*. Ginebra: OMM.

- Puertos del Estado. (1 de julio de 2024). *Puertos del Estado*. Obtenido de <https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>
- REE. (2024). *Informe resumen de energías renovables 2023*. REE.
- REE. (27 de mayo de 2024). *Red eléctrica*. Obtenido de <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-de-energias-renovables/viento/potencia-instalada-viento>
- REE. (julio de 2024). *REE a tiempo real*. Obtenido de <https://demanda.ree.es/visiona/baleares/formentera5m/total>
- REE. (3 de marzo de 2024). *Sistema eléctrico*. Obtenido de <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-de-energias-renovables/viento/potencia-instalada-viento>
- Research Gate. (2 de julio de 2024). *Research Gate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Some-catenary-configurations-assumed-by-the-risers_fig1_242516491
- ResearchGate. (s.f.). Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Monopole-foundation-consisting-of-a-driven-pile-3_fig1_283244201
- Roberto Turconi, A. B. (2013). *Evaluación del ciclo de vida (LCA) de las tecnologías de generación de electricidad: descripción general, comparabilidad y limitaciones*.
- Roca, J. A. (26 de diciembre de 2018). *Cómo la eólica marina hace frente a profundidades de 60 metros o más*. *El periódico de la energía*.
- Siemens Gamesa. (s.f.). *Siemens Gamesa*. Obtenido de <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-222-dd>
- Vector renewables. (1 de febrero de 2023). Obtenido de <https://www.vectorenrenewables.com/es/blog/sabes-lo-que-es-el-efecto-estela-en-un-parque-eolico>
- Vestas. (1 de julio de 2024). *Vestas*. Obtenido de <https://www.vestas.com/en/energy-solutions/offshore-wind-turbines/V236-15MW>
- Vestas. (2024). *Vestas*. Obtenido de <https://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/OffshoreProductBrochure/v236-150-mw-brochure/?page=6>
- Viento 10. (16 de octubre de 2018). *Hotel viento 10*. Obtenido de <https://hotelviento10.es/es/varios/rosa-de-los-vientos>
- Webinar Deployment of the off shore wind renewable energy. (9 de mayo de 2021). *UTN.BA*. Obtenido de <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/parque-eolico-marino-kriegers-flak-de-dinamarca/>
- Wikipedia. (s.f.).
-

Wikipedia. (2024 de enero de 2024). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Formentera>