

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis Integral de Viabilidad y Sostenibilidad para la Implementación de una Planta Eólica

Autor: Ignacio Rodríguez López

Tutor: Miguel Torres García

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis Integral de Viabilidad y Sostenibilidad para la Implementación de una Planta Eólica

Autor:
Ignacio Rodríguez López

Tutor:
Miguel Torres García
Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Análisis Integral de Viabilidad y Sostenibilidad para la Implementación de una Planta Eólica

Autor: Ignacio Rodríguez López

Tutor: Miguel Torres García

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis compañeros

Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en este proyecto:

A mis abuelos, quienes han sido siempre un ejemplo de vida y a quienes admiro profundamente.

A mis padres, por su apoyo incondicional a lo largo de todo el camino.

A mis hermanos, Miguel, María y Paco, por compartir conmigo la vida y por ser un pilar fundamental.

A mis compañeros, muchos de los cuales se han convertido en amigos, por su apoyo incondicional, la ayuda brindada, y por compartir conmigo tanto momentos alegres como aquellos más desafiantes. Gracias por hacer esta etapa memorable y por los recuerdos que me llevo conmigo.

A todos mis profesores a lo largo de mi educación, quienes han contribuido significativamente en mi formación académica y personal. En especial, agradezco a D. Miguel Torres, tutor de este proyecto, por su cercanía y amabilidad.

Ignacio Rodríguez López

Sevilla, 2024

Resumen

Este proyecto se centra en la evaluación de viabilidad para el desarrollo de una planta eólica, subrayando la importancia crucial de la energía eólica en el panorama energético contemporáneo. Se abordan tanto las oportunidades como los desafíos inherentes a esta fuente de energía renovable. Se profundiza en los aspectos técnicos y de diseño de la instalación, incluyendo la selección estratégica de aerogeneradores y su disposición, basada en criterios técnicos y económicos para optimizar su rendimiento. Además, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de los costos asociados tanto a la instalación como a la operación de la planta, acompañado de un detallado examen de la viabilidad económica del proyecto.

Asimismo, se realiza una evaluación exhaustiva del impacto ambiental del proyecto, destacando los beneficios en términos de sostenibilidad. En las conclusiones, se resumen los hallazgos más significativos del estudio y se reflexiona sobre la viabilidad global del proyecto, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales. Se ofrecen también recomendaciones para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la energía eólica y la sostenibilidad energética.

Abstract

This project focuses on assessing the feasibility for developing a wind power plant, emphasizing the crucial importance of wind energy in today's energy landscape. It addresses both the opportunities and challenges inherent in this renewable energy source. The technical and design aspects of the installation are explored in depth, including the strategic selection and arrangement of wind turbines based on technical and economic criteria to optimize their performance. Additionally, a comprehensive analysis of the costs associated with both the installation and operation of the plant is conducted, accompanied by a detailed examination of the project's economic viability.

Furthermore, a thorough evaluation of the project's environmental impact is carried out, highlighting the sustainability benefits. The conclusions summarize the most significant findings of the study and reflect on the overall feasibility of the project, considering technical, economic, and environmental aspects. Recommendations are also provided for future research and developments in the field of wind energy and energy sustainability.

Índice

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract	V
Índice	VII
Índice de Ilustraciones	IX
Índice de Tablas	X
Índice de Gráficas	XI
Notación	XII
1 Introducción	1
1.1 Importancia de la energía eólica en el contexto energético actual	1
1.2 Eólica offshore	2
1.3 Problemas que impiden la implantación de parques eólicos en España	4
2 Diseño de la instalación eólica	7
2.1 Comparativa Onshore – Offshore	7
2.2 Características del estudio	8
3 Caracterización del recurso eólico	9
3.1 Ubicación	9
3.2 Análisis de vientos	11
3.3 Resultados de la caracterización del recurso eólico	12
3.3.1 Distribución de frecuencias y rosa de vientos	12
3.3.2 Rugosidad y perfil de velocidades	14
4 Selección de aerogeneradores	17
4.1 Criterios de selección	17
4.2 Características de los aerogeneradores	17
4.3 Análisis técnico y económico para la selección de aerogeneradores	21
4.3.1 Producción energética	21
4.3.2 Análisis económico	23
5 Elección y distribución de la instalación	27
5.1 Estudio de optimización de la disposición de los aerogeneradores	27
5.2 Resultados del diseño del parque eólico	29
6 Aspectos económicos de la instalación	31
6.1 Detalle de los costos involucrados en la instalación y operación de la planta eólica	31
6.2 Análisis de rentabilidad	31
6.3 Discusión sobre la viabilidad económica	33
7 Impacto Ambiental	35
7.1 Evaluación del impacto ambiental	35
7.2 Propuestas de medidas de mitigación y compensación	36
7.3 Reciclaje de palas de aerogeneradores	37

8	Conclusiones.....	39
8.1	<i>Recapitulación de los principales hallazgos del estudio</i>	<i>39</i>
8.2	<i>Reflexión sobre la viabilidad global del proyecto.....</i>	<i>39</i>
8.3	<i>Recomendaciones para futuras investigaciones o desarrollos</i>	<i>40</i>
	Referencias	41

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Histórico de instalaciones	2
Ilustración 2: Histórico de instalaciones offshore	2
Ilustración 3: Comparativa Offshore – Onshore	7
Ilustración 4: Parques eólicos instalados en España	9
Ilustración 5: Vista aérea Sierra de Urbasa	10
Ilustración 6: Vista aérea Sierra de la Moredina	11
Ilustración 7: Distribución de frecuencias y osa de vientos a 50 metros de altura en Urbasa	12
Ilustración 8: Distribución de frecuencias y rosa de vientos a 100 metros de altura en Urbasa	13
Ilustración 9: Distribución de frecuencias y rosa de vientos a 50 metros de altura en la Moredina	13
Ilustración 10: Distribución de frecuencias y rosa de vientos a 100 metros de altura en la Moredina	14
Ilustración 11: Perfil vertical medio de velocidad del viento en Urbasa	15
Ilustración 12: Perfil medio diario de la velocidad del viento a 50 – 100 metros en Urbasa	15
Ilustración 13: Perfil vertical medio de la velocidad del viento en la Moredina	16
Ilustración 14: Perfil medio diario de la velocidad del viento a 50 – 100 metros en la Moredina	16
Ilustración 15: Perfil de potencia de la turbina G114-2.0MW	19
Ilustración 16: Perfil de potencia de la turbina E-115 3.000	20
Ilustración 17: Aérea de la distribución este-oeste	28
Ilustración 18: Aérea de la distribución norte-sur	28
Ilustración 19: Aérea distribución aprovechando topografía	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ficha técnica Gamesa G114-2.0MW	18
Tabla 2: Ficha técnica Enercon E-115 3.000	19
Tabla 3: Energía total producida en un año	21
Tabla 4: Coste turbina	23
Tabla 5: Coste instalación y mantenimiento	24
Tabla 6: Coste total	24
Tabla 7: Coste del parque	31
Tabla 8: Inversión	33

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Comparativa de la energía producida anual	22
Gráfica 2: Análisis económico	25

NOTACIÓN

°C	Grados centígrados
\$	Dólar
€	Euro
AEE	Asociación Empresarial Eólica
BiMEP	Biscay Marine Energy Platform
CENER	Centro Nacional de Energías Renovables
COP28	Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático
CO ₂	Dióxido de carbono
EIA	Evaluación del Impacto Ambiental
GW	Gigavatios
GWEC	Global Wind Energy Council
Hz	Hercios
IEA	Agencia Internacional de la Energía
IGBT	IGBT Insulated Gate Bipolar Transistors
IRA	Inflation Reduction Act
I+D+i	Investigación, desarrollo e innovación
km	kilómetro
kW	Kilovatios
kWh	Kilovatios por hora
LIC	Lugares de Importancia Comunitaria
m	Metros
min	Minutos
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
MW	Megavatios
POEM	Plan de Ordenación del Espacio Marítimo
s	Segundos
SATH	Swinging Around Twin Hull
TIR	Tasa Interna de Retorno
U	Umdrehungen
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
U/min	Umdrehungen pro Minute
V	Voltios
VAN	Valor Actual Neto
WHEEL	Wind Hybrid Esteyco Evolution for Low-carbon Solutions
W2P-HERA	Hybridisation of Wind Energy and Aquaculture
ZEC	Zonas Especiales de Conservación
ZEPA	Zona de Especial Protección para las Aves

1 INTRODUCCIÓN

“El pesimista se queja del viento; el optimista espera que cambie; el realista ajusta las velas.

- William George Ward -

La imperiosa necesidad de abordar el cambio climático ha catapultado a la humanidad hacia uno de los desafíos más acuciantes de nuestra era. Empresas, consumidores y entidades gubernamentales se ven compelidos a adoptar medidas contundentes para enfrentar esta grave amenaza. El año 2020 marcó el quinto aniversario del histórico Acuerdo de París, un hito en el que 194 partes, incluyendo 193 países y la Unión Europea, se comprometieron a limitar el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C, con la aspiración adicional de trabajar para alcanzar los 1.5°C y lograr emisiones netas nulas para 2050.

El sector energético se erige como un protagonista central en esta batalla, siendo responsable de una parte sustancial de las emisiones de CO₂. Por ende, su contribución es esencial para alcanzar los objetivos de descarbonización establecidos en el Acuerdo de París, así como para alcanzar la neutralidad climática para 2050.

En este momento crucial, España se encuentra en una encrucijada en su búsqueda de una matriz energética más sostenible. La electrificación proveniente de fuentes renovables emerge como una estrategia primordial para reducir las emisiones de manera significativa.

El pronóstico de un crecimiento notable en la demanda eléctrica, según análisis de instituciones como la Agencia Internacional de la Energía (IEA), enfatiza la necesidad de una transición energética acelerada. Se espera que la electricidad juegue un papel cada vez más predominante en el consumo total de energía final en las próximas décadas, lo que requerirá un aumento considerable en la capacidad de generación renovable.

En este contexto de transformación energética, el objetivo de este proyecto es investigar el papel y la viabilidad de la energía eólica en el panorama energético español. A través de un análisis exhaustivo, se pretende contribuir al avance hacia un futuro energético más sostenible y resiliente, donde la energía eólica tenga un papel fundamental en la mitigación del cambio climático.

1.1 Importancia de la energía eólica en el contexto energético actual

En 2023, la capacidad de energía eólica experimentó un notabilísimo crecimiento, con una cifra récord de 117 GW añadidos a nivel global, incrementando un 50% respecto a los años anteriores. Este logro es especialmente significativo dado el entorno económico desafiante y las interrupciones en la cadena de suministro global, agravadas por las crisis sanitaria y energética a nivel mundial.

New installations GW

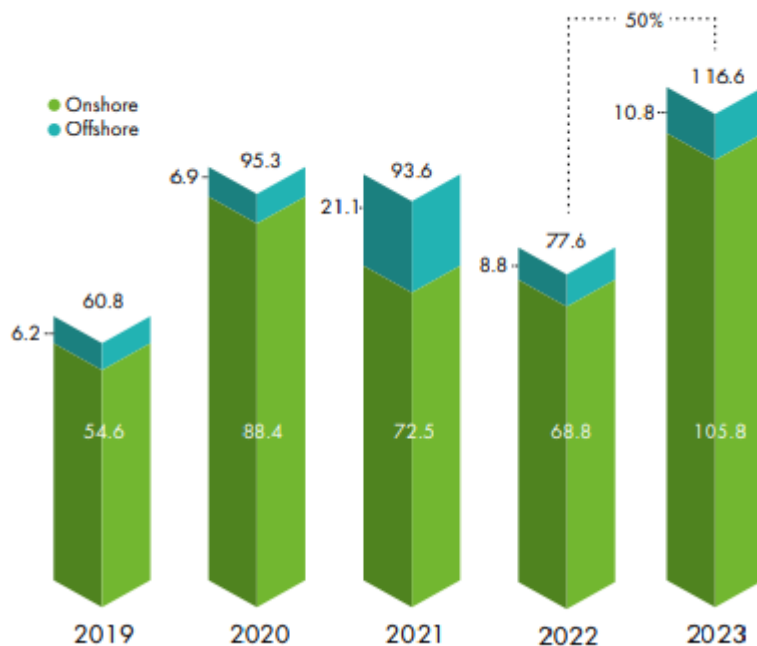


Ilustración 1: Histórico de instalaciones

Fuente: GWEC, 2024

La energía eólica terrestre lideró este crecimiento, con una adición de 116.6 GW en todo el mundo, con China e India como principales contribuyentes, superando Asia Pacífica así el 70% de estas instalaciones. A pesar de una desaceleración en América Latina, África y Medio Oriente, y una notable caída en las instalaciones onshore en los Estados Unidos cayendo hasta niveles de 2014, Europa destacó con 18.3 GW de capacidad de energía añadida, aunque disminuye su participación de mercado en capacidad instalada en 8 puntos hasta el 16%.

El sector de la energía eólica marina también registró un crecimiento significativo, con 10.8 GW adicionales conectados a las redes eléctricas el año pasado. Esto supone un 24% mayor que el año anterior, haciendo del 2023 el segundo mayor registro de eólica offshore de la historia.

1.2 Eólica offshore

La energía eólica offshore está experimentando un impulso sin precedentes gracias a una serie de desarrollos innovadores y al compromiso renovado de los gobiernos y desarrolladores. La inclusión de un objetivo para triplicar la capacidad de energías renovables para 2030 en el texto final de la COP28 marca un hito histórico para la industria eólica y otras tecnologías de energía renovable. Este aumento en la ambición ha generado un optimismo renovado en la industria eólica, tanto a corto como a largo plazo.

Proyecciones como la de GWEC Market Intelligence indican que las nuevas instalaciones de energía eólica offshore superarán el récord anterior y alcanzarán los 130 GW en 2024. Se espera que en los próximos cinco años se añadan aproximadamente 791 GW de nueva capacidad bajo las

New offshore installations (MW)

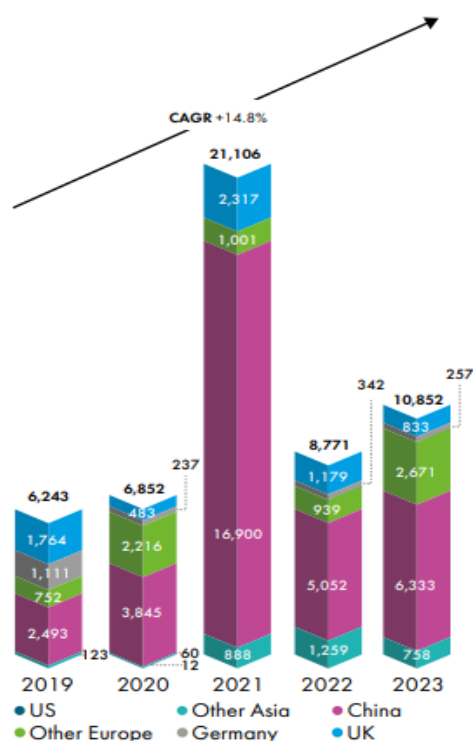


Ilustración 2: Histórico de instalaciones offshore

Fuente: GWEC, 2024

políticas actuales, lo que equivale a 158 GW de nuevas instalaciones cada año hasta 2028.

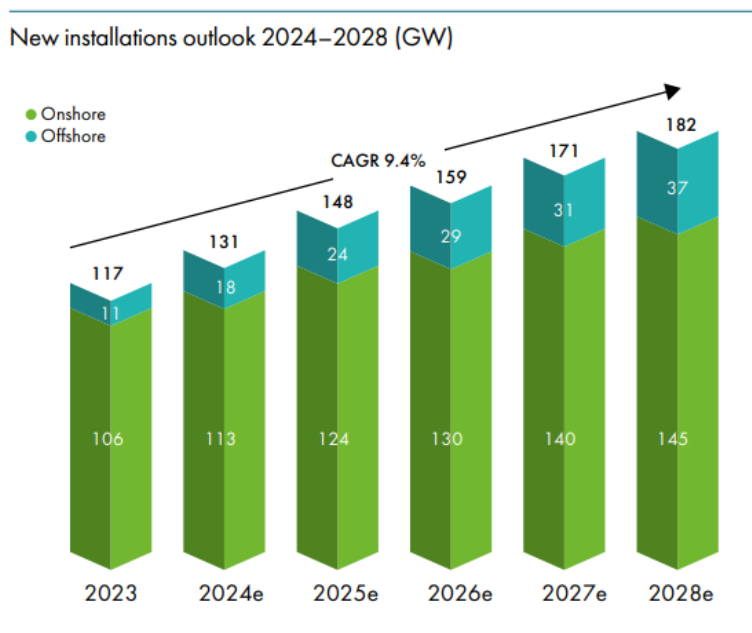


Ilustración 3: Previsión nuevas instalaciones a nivel mundial

Fuente: GWEC, 2024

La importancia de la innovación y el desarrollo en este sector es crucial para impulsar este crecimiento proyectado. Europa, Estados Unidos y China lideran este impulso con medidas como la aceleración del desarrollo de renovables en Europa tras la invasión de Ucrania por parte de Rusia, la mayor inversión climática del país hasta la fecha en Estados Unidos (IRA; Inflation Reduction Act), y el compromiso de China de que las fuentes de energía no fósiles representen más del 80% del consumo total de energía para 2060.

Focalizando en España, esta desempeña un papel significativo en la investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) en el campo de la energía eólica offshore, particularmente el País Vasco destaca como una región líder en este ámbito. En particular cuenta con importantes infraestructuras y empresas que impulsan el avance de esta tecnología.

Una de las contribuciones más destacadas es la Biscay Marine Energy Platform (BiMEP). Esta infraestructura de ensayos de prototipos de captadores de energías marinas, ubicada en el mar Cantábrico frente a la costa de Arminza, ofrece un entorno único para probar la viabilidad técnica y económica de diversas tecnologías en condiciones reales de mar abierto. Desde su inicio en junio de 2015, BiMEP ofrece un área con unas condiciones excepcionales para probar la eficacia de nuevos mecanismos y tecnologías para la demostración de la viabilidad técnica y económica de los distintos conceptos. Dispuesto con cables submarinos equipados con fibras ópticas, subestación onshore equipada con transformadores y medición de recurso mediante boya oceanográfica y lidar flotante, también cuenta con posibilidad de evacuación de energía generada en baja tensión (690 V) y área restringida a la navegación con balizamiento perimetral.

Además, sólo el País Vasco alberga cinco de las cincuenta tecnologías de plataformas flotantes más destacadas del mundo. Empresas como Saitec, Nautilus, Hivewind, Esteyco e Isati tienen su sede en esta región y están a la vanguardia de la innovación en el diseño y desarrollo de plataformas flotantes para parques eólicos offshore.

Saitec, por ejemplo, ha desarrollado la plataforma SATH (Swinging Around Twin Hull), que ofrece un enfoque único y altamente innovador para la energía eólica offshore flotante. Por su parte, Hivewind se destaca por su plataforma flotante semi-sumergible, diseñada para una fabricación rápida y rentable. Nautilus Floating Solutions desarrolla cimentaciones flotantes semi-sumergibles con cuatro apoyos, mientras que Esteyco lidera el proyecto WHEEL (Wind Hybrid Esteyco Evolution for Low-carbon solutions), seleccionado por la Comisión Europea para construir un prototipo a escala real de su tecnología de viento flotante. Isati, por último, participa en el

proyecto W2P-HERA (Hybridisation of Wind Energy and Aquaculture), que busca desarrollar soluciones multiusos en tecnología W2Power.

1.3 Problemas que impiden la implantación de parques eólicos en España

La instalación de parques eólicos a nivel global enfrenta una serie de desafíos que dificultan su rápida implementación, a pesar de su potencial para contribuir significativamente a la transición energética y la sostenibilidad.

Uno de los principales problemas es la complejidad y la duración de los procedimientos de permisos. Los proyectos eólicos pueden tardar hasta nueve años en pasar desde la fase de desarrollo inicial hasta su plena puesta en marcha, siendo la mayor parte de este tiempo consumido por los procesos de aprobación de permisos y concesiones. Cualquier barrera o retraso adicional en esta fase prolonga aún más los plazos, lo que desalienta la inversión y ralentiza el desarrollo.

La falta de políticas y regulaciones adecuadas es otro obstáculo significativo. Muchos países carecen de marcos regulatorios robustos que faciliten el desarrollo de la energía eólica. Además, la descoordinación entre diversas agencias gubernamentales complica y retrasa el proceso de permisos, creando una burocracia innecesaria y obstáculos regulatorios que dificultan el avance de los proyectos.

La competencia por el uso del suelo y el mar es también un desafío notable. La asignación de terrenos y espacios marinos para proyectos eólicos no siempre está alineada con los objetivos climáticos, lo que resulta en mercados sobrecalentados y procesos de subasta restrictivos. Además, la falta de una planificación espacial estratégica que considere los impactos ambientales y las competiciones con otros usos del mar puede llevar a retrasos y conflictos, dificultando el progreso de los proyectos eólicos.

Integrar la energía eólica en los sistemas eléctricos también presenta desafíos. Se requiere un diseño del mercado eléctrico que incorpore conocimientos detallados y experiencia en marcos de gobernanza marina, políticas industriales y de la cadena de suministro. Además, la infraestructura de red debe ser flexible y robusta para gestionar la variabilidad de la generación de energía eólica, especialmente en el caso de la energía eólica offshore.

La resistencia comunitaria y social es otro obstáculo considerable. Las preocupaciones sobre el impacto en las comunidades locales, como las pesqueras, pueden generar resistencia y retrasos en los proyectos. La falta de participación efectiva y aceptación por parte de las comunidades afectadas puede dificultar la implementación y el éxito de los proyectos eólicos.

La aceleración del despliegue de la energía eólica requiere esfuerzos sin precedentes tanto del gobierno como del sector privado, trabajando en estrecha colaboración. Alianzas público-privadas son esenciales para superar los desafíos del desarrollo de la energía eólica. Iniciativas como el "Sector Deal" del Reino Unido, que fomenta la colaboración entre el gobierno y la industria, pueden servir de modelo para otras regiones que buscan superar los obstáculos regulatorios y logísticos.

Las consideraciones económicas y financieras también juegan un papel crucial. La inversión inicial en proyectos eólicos es elevada, lo que requiere una planificación financiera detallada y el acceso a financiamiento. Además, es crucial la creación de incentivos económicos claros y sostenibles para fomentar la inversión en energía eólica.

Ejemplos específicos ilustran estos desafíos y cómo algunos países los están abordando. China, por ejemplo, es el único país que ha mostrado la capacidad de entregar energía eólica offshore a la escala y velocidad necesarias, con ambiciosos objetivos de 100 GW para 2025 y 1,000 GW para 2050. Por otro lado, países como Vietnam enfrentan una gran incertidumbre política, con planes de desarrollo de energía eólica que aún no se han implementado completamente. Japón y Taiwán, a pesar de tener marcos políticos básicos, carecen de la infraestructura política robusta necesaria para una escalada masiva.

En el contexto español, los problemas que impiden la implantación de parques eólicos presentan características particulares que complican aún más el desarrollo de estos proyectos.

Uno de los desafíos más destacados es la profundidad de la plataforma continental. A diferencia de otros países, España cuenta con una plataforma continental muy limitada; a medida que uno se aleja de la costa, la

profundidad de las aguas aumenta abruptamente. Esta característica geográfica implica la necesidad de utilizar aerogeneradores flotantes, una tecnología que aún está en fase de desarrollo y que conlleva mayores costos y complejidades técnicas.

La burocracia también es un problema significativo en España. La normativa relacionada con la energía eólica está desactualizada o no se ha publicado completamente. El inicio de estos proyectos requiere identificar las zonas con mayor potencial, teniendo en cuenta las interferencias y compatibilidades con otras actividades como la pesca, los espacios militares estratégicos y las áreas protegidas medioambientalmente. Este proceso se realiza a través del Plan de Ordenación del Espacio Marítimo (POEM).

Otro desafío importante es el reciclaje de las palas de los aerogeneradores. Las palas, generalmente hechas de materiales compuestos, son difíciles de reciclar y requieren procesos específicos para su tratamiento al final de su vida útil, lo cual añade una capa adicional de complejidad y costo a los proyectos eólicos.

La regulación autonómica y la planificación territorial también presentan problemas. La débil planificación autonómica del territorio y la falta de ordenación y zonificación clara sobre la capacidad de acogida complican la guía de los proyectos de los promotores. En Asturias, por ejemplo, se acusa a la Coordinadora Ecoloxista de fraccionar grandes proyectos para facilitar la autorización ambiental del Principado. El gobierno está en proceso de actualizar las directrices para crear un marco general que defina dónde se pueden desarrollar parques eólicos y dónde no.

La zonificación ambiental es esencial para la planificación de proyectos eólicos, pero actualmente carece de una implementación uniforme y eficaz. El documento para la implantación de energías renovables destaca la necesidad de integrar diversos indicadores ambientales para determinar las áreas más adecuadas para estos proyectos. Esto incluye la protección de la avifauna contra colisiones y electrocuciones en líneas eléctricas de alta tensión, así como la promoción de la conectividad ecológica mediante la creación de "autopistas salvajes". Se otorga especial atención a las Áreas Importantes para la Conservación de las Aves y la Biodiversidad, incluyendo los Hábitats de Interés Comunitario y las áreas designadas dentro de la Red Natura 2000, como las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) y los Lugares de Importancia Comunitaria (LIC), así como las Zonas Especiales de Conservación (ZEC). Además, se consideran los Espacios Naturales Protegidos, los Humedales RAMSAR y las Zonas Especialmente Protegidas de Importancia para el Mediterráneo en su parte terrestre. Otros elementos clave de la zonificación incluyen la preservación de la visibilidad, la protección de rutas culturales como el Camino de Santiago y las vías pecuarias, así como la conservación de montes de utilidad pública y lugares de interés geológico, además de la protección de Bienes del Patrimonio Mundial de la UNESCO.

La competencia con otros sectores, como la pesca, la ganadería y el turismo, representa otro desafío considerable para la implementación de parques eólicos en España. La energía eólica compite por el espacio marino con actividades tradicionales como la pesca, lo que requiere encontrar un equilibrio que haga compatible el desarrollo eólico con la actividad pesquera tradicional. Además, el turismo, siendo la máxima actividad económica del país, también entra en competencia, ya que la instalación de parques eólicos puede afectar la estética y el atractivo paisajístico de las áreas costeras y rurales, lo que puede impactar negativamente en la industria turística. Grupos como Rede Galega Stop Eólicos, el Fondo para la Defensa Jurídica de la Cordillera Cantábrica y otras organizaciones locales se oponen a la construcción de nuevas instalaciones eólicas, argumentando que estas afectan negativamente a sus medios de vida, al medio ambiente y al turismo local. En este sentido, encontrar soluciones que permitan la coexistencia armoniosa entre la energía eólica y otros sectores económicos se convierte en un aspecto crucial.

En conclusión, mientras que los desafíos globales para la implementación de parques eólicos incluyen complejidades en los permisos, falta de políticas adecuadas, competencia por el uso del suelo y del mar, y dificultades en el reciclaje de palas de aerogeneradores, España enfrenta además problemas específicos como la profundidad de su plataforma continental, burocracia desactualizada y competencia con otros sectores económicos. Abordar estos problemas es esencial para aprovechar plenamente el potencial de la energía eólica y contribuir a la transición energética y sostenibilidad del país.

2 DISEÑO DE LA INSTALACIÓN EÓLICA

El núcleo del proyecto radica en la creación de un parque eólico de 6MW destinado a generar energía renovable. La decisión surge de la necesidad apremiante de abordar los desafíos energéticos y medioambientales que enfrentamos en la actualidad. La creación de un parque eólico no solo representa un paso hacia la autosuficiencia energética, sino también refleja el compromiso con la protección del medio ambiente y la lucha contra el cambio climático. Es un paso firme hacia un futuro más sostenible y equitativo, donde las energías renovables desempeñan un papel fundamental en nuestra matriz energética.

Asimismo, la implementación de este parque eólico se alinea con las políticas y objetivos establecidos a nivel nacional e internacional en materia de energía y medio ambiente. Contribuirá a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y promoverá el desarrollo económico sostenible en la región donde se establezca. En resumen, la creación de este parque eólico representa un paso estratégico y decisivo hacia un futuro más limpio, verde y sostenible.

2.1 Comparativa Onshore – Offshore

En el contexto del proyecto, donde nos enfrentamos a la crucial decisión entre optar por una instalación onshore u offshore para el parque eólico, es imperativo considerar detenidamente las características y desafíos asociados con cada opción. Si bien la eólica offshore presenta ventajas en términos de capacidad de generación y potencia unitaria, la eólica onshore emerge como la elección más prudente y estratégica.

Uno de los factores determinantes es la diferencia en la penetración de mercado entre estas dos formas de producción de energía eólica. Mientras que la eólica terrestre está ampliamente desplegada en todo el mundo, la eólica marina, como se ha comentado, aún se encuentra en una etapa incipiente de desarrollo. Esta disparidad se refleja en las cifras de producción, donde la eólica terrestre supera en cantidad a su contraparte marina, a pesar de que esta última tiene una capacidad instalada por turbina significativamente mayor.

La velocidad del viento es otro aspecto crucial que considerar. En alta mar, el viento es considerablemente más fuerte y constante que en tierra firme, lo que permite una generación de energía más potente. Sin embargo, esta ventaja se ve contrarrestada por los desafíos técnicos y económicos asociados con la instalación y mantenimiento de parques eólicos marinos. Desde complejas cimentaciones hasta altos costos de explotación y exposición a condiciones ambientales extremas, como la corrosión por el ambiente salino, los parques eólicos offshore presentan una serie de obstáculos significativos que deben abordarse.

En contraste, la eólica onshore ofrece una tecnología más madura y probada, lo que se traduce en costos de instalación y mantenimiento considerablemente más bajos. Además, la distribución geográfica de los parques eólicos terrestres es más uniforme y no se ve limitada por la profundidad del agua o la distancia a la costa. Esto facilita su implementación en una variedad de ubicaciones y entornos, lo que a su vez reduce los costos asociados con la infraestructura y el transporte.

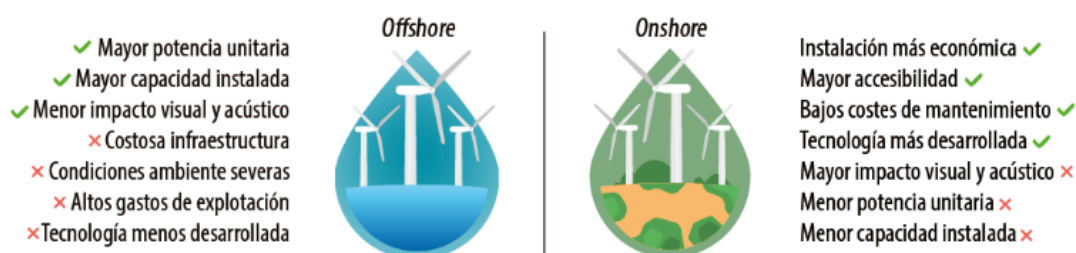


Ilustración 3: Comparativa Offshore – Onshore

Fuente: <http://www.eolivertical.es/2019/08/28/eolica-onshore-vs-offshore/>

En resumen, si bien la eólica offshore puede ofrecer una mayor capacidad de generación en teoría, los desafíos técnicos, económicos y logísticos asociados con su implementación hacen que la eólica onshore sea la opción más viable y estratégica para nuestro proyecto. Además, su tecnología más desarrollada y sus menores costos la posicionan como la alternativa más rentable y accesible, lo que nos permite avanzar hacia nuestros objetivos de manera eficiente y sostenible.

2.2 Características del estudio

Para el diseño de nuestro parque eólico de 6 MW de potencia instalada, hemos considerado varias características clave que aseguran una evaluación precisa y completa de la viabilidad del proyecto. El estudio se enfocará en dos posibles casos por área de estudio, analizando aspectos críticos como la ubicación, la potencia de las turbinas y las alturas de las turbinas.

- Ubicación:

La selección de la ubicación es fundamental para el éxito del parque eólico. En este estudio, se considerarán dos áreas potenciales que presentan condiciones óptimas de viento y accesibilidad. La evaluación de estas áreas incluirá factores como la proximidad a la infraestructura existente, el impacto ambiental y las restricciones legales.

- Potencia de Turbinas:

Se evaluarán diferentes configuraciones de potencia para las turbinas eólicas. Este análisis permitirá determinar la combinación más eficiente de turbinas para alcanzar la capacidad total de 6 MW. Se considerarán tanto turbinas de menor capacidad con mayor número de unidades, como turbinas de mayor capacidad con menos unidades.

- Alturas de Turbina:

La altura de las turbinas es un factor crucial que afecta la eficiencia y la producción de energía del parque eólico. Se estudiarán diferentes alturas de torre para cada área de estudio, considerando cómo las variaciones en la altura pueden influir en la captura de viento y en la reducción de turbulencias causadas por la orografía.

El análisis comparativo de estos dos casos por área de estudio permitirá identificar la configuración óptima para maximizar la producción de energía y minimizar los costos de instalación y mantenimiento. La metodología empleada incluirá simulaciones y modelos de análisis de vientos detallados para garantizar que la decisión final esté basada en datos precisos y representativos de las condiciones reales del sitio seleccionado.

3 CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO EÓLICO

El siguiente punto del proyecto se centra en caracterizar el recurso eólico, un elemento fundamental para la viabilidad y eficacia del parque eólico. El recurso eólico se refiere a la energía cinética del viento disponible en una determinada ubicación, la cual es crucial para la generación de energía a través de aerogeneradores. Un análisis preciso de este recurso permite identificar las zonas con mayor potencial de viento, lo que facilita la selección de la ubicación óptima para la instalación de los aerogeneradores. Es fundamental entender la distribución, velocidad y dirección del viento en el área de estudio para maximizar la producción de energía y garantizar la eficiencia operativa del parque eólico.

La recopilación y análisis de datos meteorológicos históricos es un paso esencial para obtener una visión clara del recurso eólico disponible en la ubicación del proyecto. En este proceso, se recolectan datos de estaciones meteorológicas, satélites y modelos climáticos históricos que ofrecen información detallada sobre la velocidad y dirección del viento a lo largo del tiempo. Estas fuentes de datos proporcionan una base sólida para comprender las tendencias y variaciones del viento en la zona de interés.

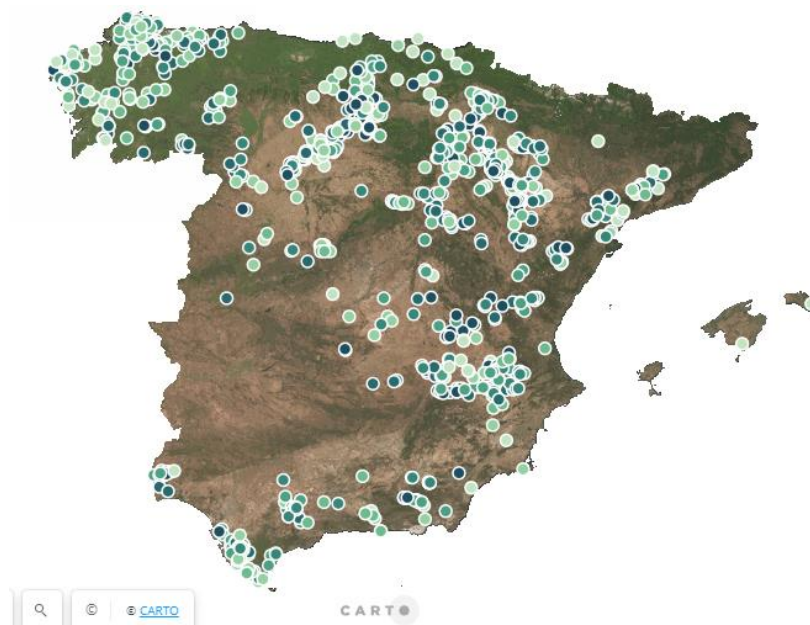


Ilustración 4: Parques eólicos instalados en España

Fuente: Red Eléctrica Española <https://www.esios.ree.es/es/mapas-de-interes/mapa-instalaciones-eolicas>

Galicia, Castilla y León, Aragón y Castilla-La Mancha son las comunidades autónomas que generan la mayor cantidad de energía eólica en España. Sin embargo, la región de la cordillera cantábrica muestra niveles escasos de generación eólica, aunque actualmente se están proyectando numerosos parques eólicos en esta área. Por esta razón, nuestra labor se centrará en esta zona. Analizar los datos históricos de viento en la cordillera cantábrica nos permitirá identificar patrones y determinar las mejores ubicaciones para los aerogeneradores. Este análisis incluye la evaluación de la velocidad promedio del viento, la frecuencia y la dirección predominante, factores críticos para la eficiencia del parque eólico.

3.1 Ubicación

La elección de las ubicaciones candidatas es crucial para el éxito del parque eólico. Hemos seleccionado dos localizaciones en la cordillera cantábrica basándonos en el mapa eólico ibérico, asegurándonos de que cumplan con las siguientes condiciones:

- 1. Velocidad media del viento a 100 metros superior a 11 m/s.** Esta condición asegura que las ubicaciones tienen un potencial eólico significativo, necesario para generar energía de manera eficiente.
- 2. No pertenecer a ningún parque natural o zona de interés natural.** Es vital evitar áreas protegidas para minimizar el impacto ambiental y cumplir con las regulaciones medioambientales.
- 3. Existencia de una carretera en sus proximidades.** La proximidad a una carretera facilita la logística de instalación y mantenimiento de las turbinas eólicas.

- **Primera Ubicación: Sierra de Urbasa, Navarra**

La primera ubicación designada para el estudio se sitúa en la Sierra de Urbasa, en Navarra, en las cercanías de la localidad de Alsasua, con coordenadas geográficas de Latitud: 42.86750 y Longitud: -2.17374. Esta ubicación ha sido seleccionada debido a su alta velocidad de viento promedio y su accesibilidad logística.



Ilustración 5: Vista aérea Sierra de Urbasa

Fuente: Google Maps

La proximidad de esta ubicación a la autovía A-1, situada a solo 2 kilómetros, es una ventaja significativa. Esto implica que únicamente se requerirá recorrer 3 kilómetros por carretera convencional y 1 kilómetro por una carretera temporal para llevar a cabo la instalación de los equipos. La facilidad de transporte es un factor crucial que puede reducir considerablemente los costos y tiempos de instalación.

- **Segunda Ubicación: Sierra de la Moredina, Asturias**

La segunda ubicación designada para el estudio se sitúa en la Sierra de la Moredina, en Asturias, en las cercanías de la localidad de Degaña, que colinda al sur con Castilla y León, con coordenadas geográficas de Latitud: 42.93688 y Longitud: -6.62375.

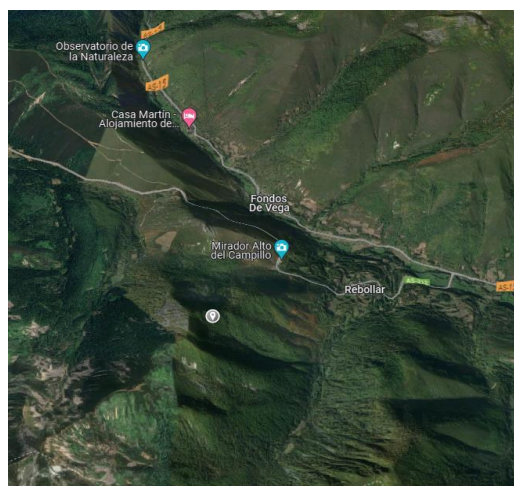


Ilustración 6: Vista aérea Sierra de la Moredina

Fuente: Google Maps

Aunque esta ubicación también cumple con las condiciones necesarias para un parque eólico eficiente, resulta menos conveniente para el transporte de equipos. La carretera más cercana, la AS-15, es una carretera nacional y no una autopista, lo que podría complicar el transporte de los grandes componentes de los aerogeneradores. Sin embargo, la inclinación del terreno en esta área es menor, lo que podría facilitar ciertos aspectos de la instalación. Además, en esta ubicación, solo será necesario construir medio kilómetro de carretera temporal, lo que podría compensar parcialmente la dificultad de acceso.

Estas ubicaciones han sido seleccionadas meticulosamente para maximizar el aprovechamiento del recurso eólico disponible, asegurando a la vez un impacto mínimo en el entorno natural y una logística de instalación manejable.

3.2 Análisis de vientos

Para caracterizar correctamente el recurso eólico, se utilizan varias herramientas y modelos que permiten analizar diferentes características del viento. Entre las más importantes se encuentran la rosa de vientos, la rugosidad del terreno y el perfil de velocidades del viento.

- Rosa de Vientos

La rosa de vientos es una representación gráfica que ilustra la distribución de las velocidades y direcciones del viento en un lugar específico durante un período de tiempo determinado. Este gráfico permite visualizar con qué frecuencia sopla el viento desde diferentes direcciones y a distintas velocidades. La longitud de cada "pétalo" en la rosa de vientos indica la frecuencia de vientos procedentes de una dirección específica. Esta información es crucial para determinar la orientación óptima de los aerogeneradores y maximizar la captura de energía eólica.

- Rugosidad del Terreno

La rugosidad del terreno se refiere a la medida de las irregularidades en la superficie del suelo que afectan la velocidad y el flujo del viento. Terrenos con alta rugosidad, como áreas boscosas o urbanas, tienden a reducir la velocidad del viento debido a la fricción, mientras que terrenos con baja rugosidad, como llanuras o superficies de agua, permiten que el viento mantenga mayores velocidades. La rugosidad del terreno se cuantifica mediante un parámetro conocido como longitud de rugosidad. Este parámetro es fundamental para modelar cómo la velocidad del viento cambia con la altura y para ajustar las predicciones del modelo eólico a las condiciones específicas del sitio.

- Perfil de Velocidades del Viento

El perfil de velocidades del viento describe cómo cambia la velocidad del viento con la altura sobre el terreno. En general, la velocidad del viento aumenta con la altura debido a la disminución de la fricción con la superficie terrestre. Este perfil se suele representar mediante una curva logarítmica o una ley de potencia que relaciona la

velocidad del viento a diferentes alturas. Conocer este perfil es esencial para diseñar la altura óptima de los aerogeneradores y maximizar la producción de energía.

Al combinar estos tres componentes – la rosa de vientos, la rugosidad del terreno y el perfil de velocidades del viento – se obtiene una caracterización detallada del recurso eólico. Esta información permite tomar decisiones informadas sobre la ubicación y diseño de los parques eólicos, asegurando que los aerogeneradores se sitúen en las zonas con mayor potencial para la generación de energía renovable.

3.3 Resultados de la caracterización del recurso eólico

3.3.1. Distribución de frecuencias y rosa de vientos.

En este apartado se detallarán los resultados obtenidos del análisis de la distribución de frecuencias y la rosa de vientos para las dos ubicaciones seleccionadas: Sierra de Urbasa en Navarra y Sierra de la Moredina en Asturias. Estos datos son cruciales para determinar la viabilidad del proyecto, ya que permiten evaluar la calidad y consistencia del recurso eólico en cada sitio.

Sierra de Urbasa a 50 metros de altura

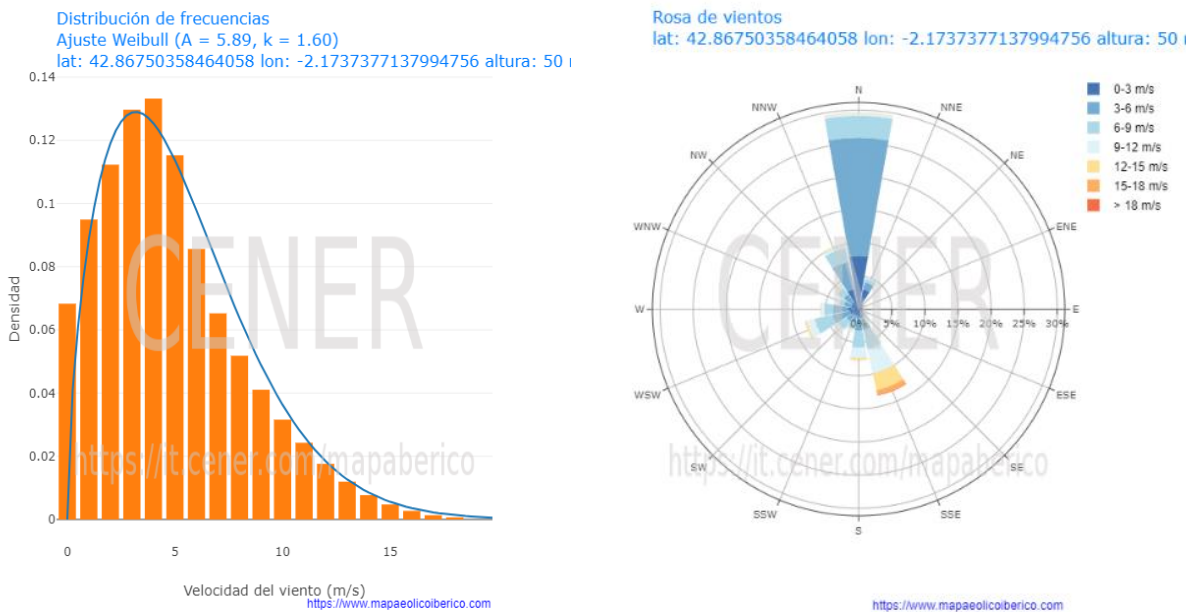


Ilustración 7: Distribución de frecuencias y rosa de vientos a 50 metros de altura en Urbasa

Fuente: Mapa Eólico Ibérico

- La rosa de vientos muestra que los vientos predominantes en esta ubicación provienen del noroeste, con una notable frecuencia de velocidades entre 8 y 12 m/s.
- La distribución de frecuencias indica que un alto porcentaje del tiempo, los vientos soplan a velocidades óptimas para la generación de energía eólica, con picos significativos en el rango de 6 a 14 m/s.

Sierra de Urbasa a 100 metros de altura

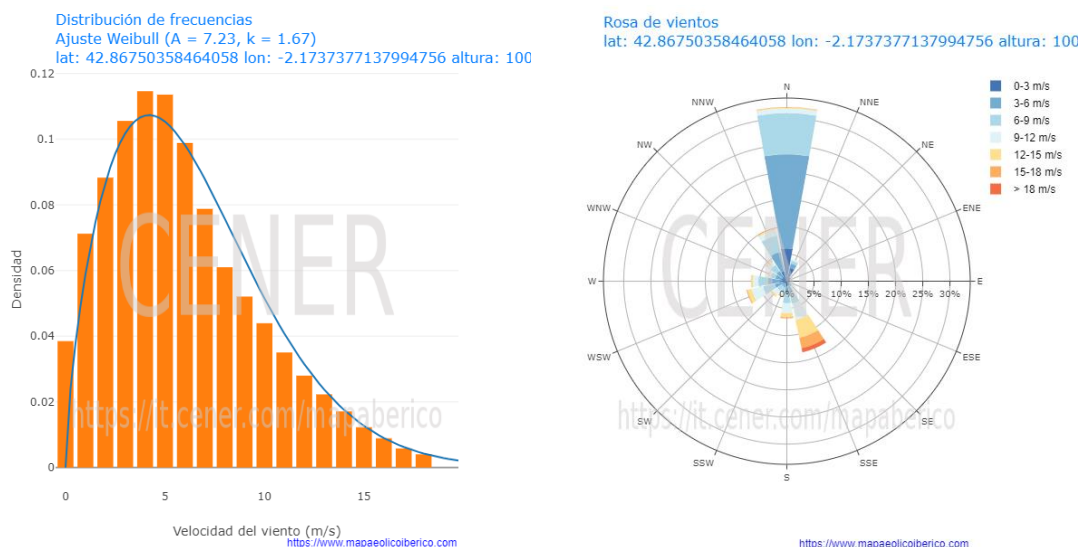


Ilustración 8: Distribución de frecuencias y rosa de vientos a 100 metros de altura en Urbasa

Fuente: Mapa Eólico Ibérico

- A 100 metros de altura, la rosa de vientos sigue mostrando predominancia del noroeste, pero con una mayor dispersión de direcciones debido a la menor fricción en alturas mayores.
- La distribución de velocidades a esta altura muestra un aumento en la frecuencia de vientos más fuertes, con un rango predominante de 10 a 14 m/s, lo que sugiere un excelente potencial para la generación de energía eólica.

Sierra de la Moredina a 50 metros de altura

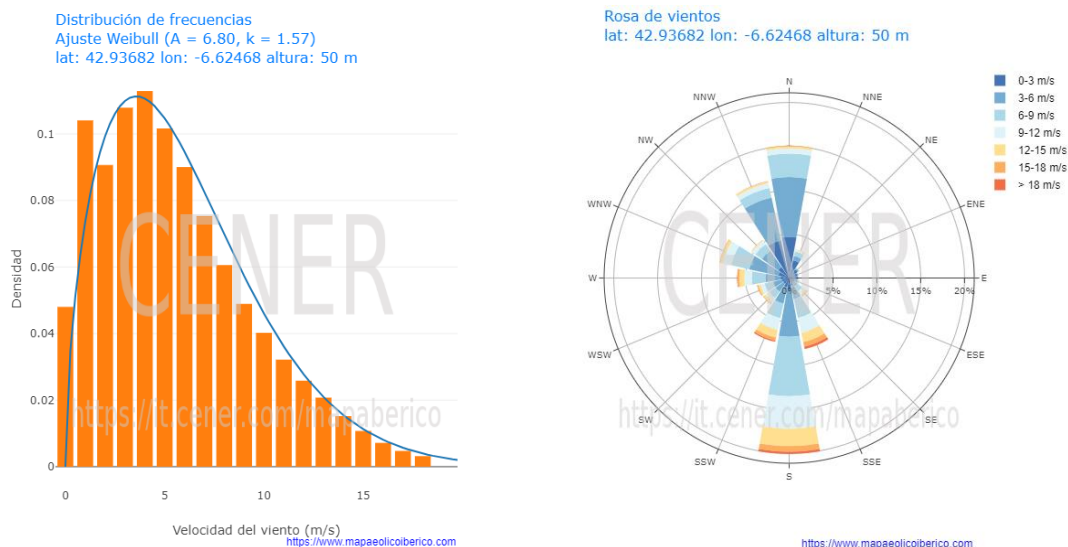


Ilustración 9: Distribución de frecuencias y rosa de vientos a 50 metros de altura en la Moredina

Fuente: Mapa Eólico Ibérico

- La rosa de vientos en Asturias muestra una predominancia de vientos del oeste y suroeste, con velocidades frecuentemente en el rango de 6 a 10 m/s.
- La distribución de frecuencias a 50 metros de altura indica una menor consistencia en las velocidades de viento comparada con Navarra, aunque todavía dentro de un rango aceptable para la generación eólica.

Sierra de la Moredina a 100 metros de altura

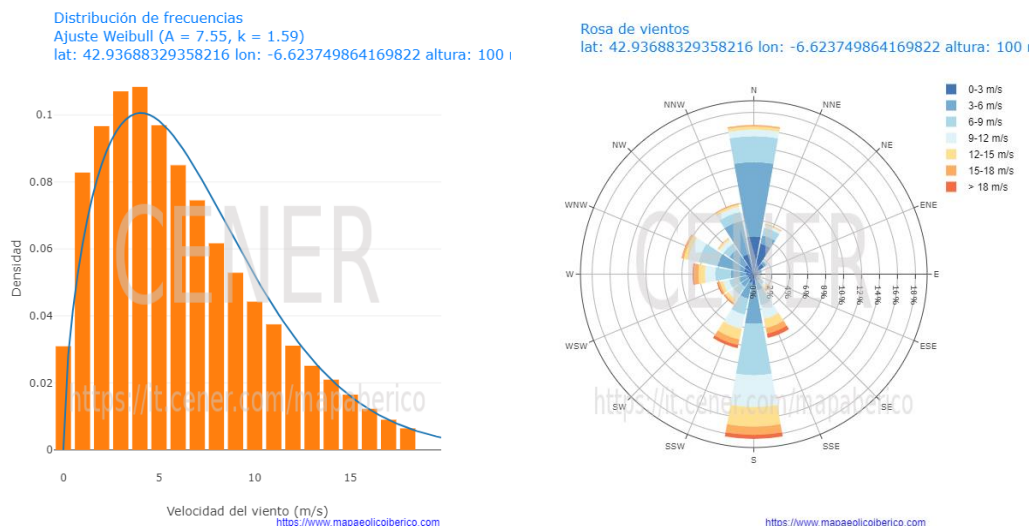


Ilustración 10: Distribución de frecuencias y rosa de vientos a 100 metros de altura en la Moredina

Fuente: Mapa Eólico Ibérico

- A 100 metros de altura, los vientos en la Sierra de la Moredina presentan una mayor consistencia y fuerza, con frecuencias notables en el rango de 8 a 12 m/s y algunas ocurrencias de vientos más fuertes.
- La rosa de vientos sigue mostrando predominancia de las mismas direcciones, pero con una mayor estabilidad en la velocidad del viento.

Del análisis de la distribución de frecuencias y rosa de vientos en ambas ubicaciones, se puede concluir lo siguiente:

1. Sierra de Urbasa, Navarra. Muestra un recurso eólico superior tanto a 50 como a 100 metros de altura, con velocidades de viento óptimas y una distribución de direcciones que favorece la generación de energía eólica de manera consistente. Esta ubicación es altamente viable para la instalación de aerogeneradores.
2. Sierra de la Moredina, Asturias: Aunque presenta un buen recurso eólico, la consistencia y fuerza de los vientos son ligeramente inferiores a las observadas en Navarra. Sin embargo, sigue siendo una ubicación viable, especialmente a 100 metros de altura.

Estos resultados respaldan la viabilidad del proyecto en ambas ubicaciones, con una preferencia potencial hacia Navarra debido a sus mejores condiciones de viento.

3.3.2. Rugosidad y perfil de velocidades

Estos factores influyen directamente en la capacidad de los aerogeneradores para captar energía del viento.

- Sierra de Urbasa, Navarra

La rugosidad del terreno se traduce en variaciones de velocidad del viento a diferentes alturas. En la Sierra de Urbasa a una altura de 50 metros, la velocidad promedio del viento es de 5,3 m/s, mientras que a 100 metros aumenta a 6,45 m/s.

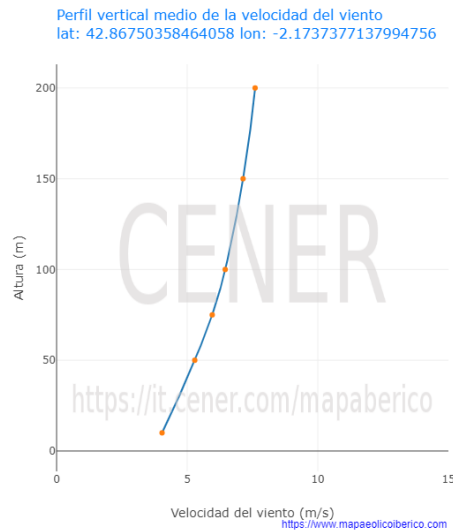


Ilustración 11: Perfil vertical medio de velocidad del viento en Urbasa

Fuente: Mapa Eólico Ibérico

El gráfico correspondiente muestra que la velocidad del viento varía a lo largo del día, siendo generalmente más alta a 100 metros que a 50 metros. Esto sugiere que instalar aerogeneradores más altos podría maximizar la captación de energía.

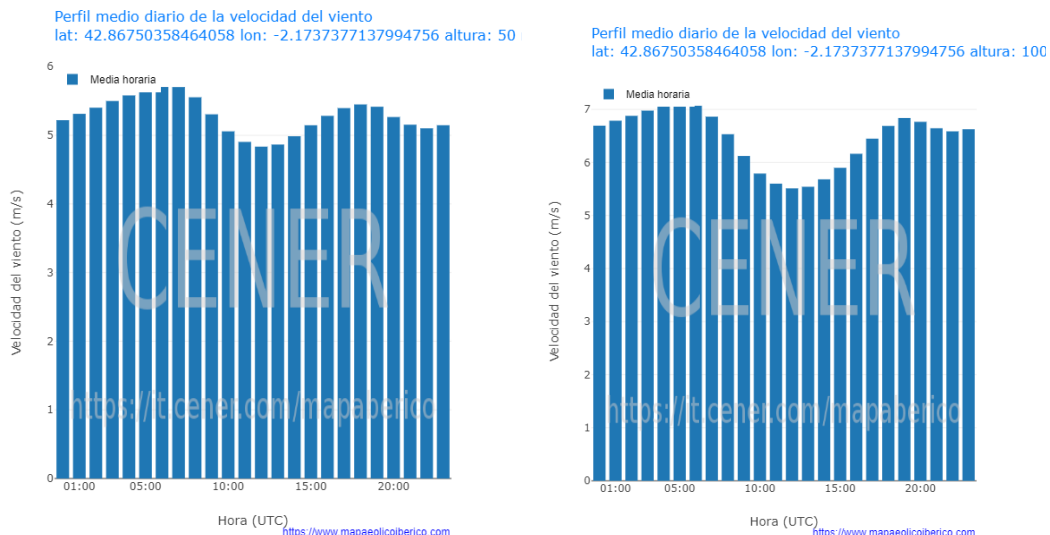


Ilustración 12: Perfil medio diario de la velocidad del viento a 50 – 100 metros en Urbasa

Fuente: Mapa Eólico Ibérico

- Sierra de la Moredina, Asturias

En Degaña, la rugosidad del terreno permite mayores velocidades promedio del viento en comparación con Urbasa. A 50 metros, la velocidad promedio es de 6,1 m/s, mientras que a 100 metros alcanza los 7,1 m/s.

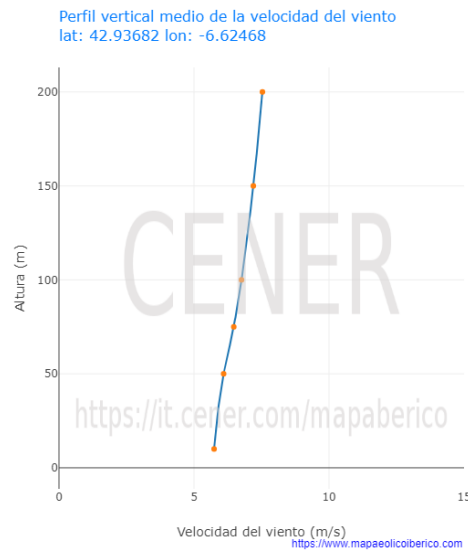


Ilustración 13: Perfil vertical medio de la velocidad del viento en la Moredina

Fuente: Mapa Eólico Ibérico

El perfil de velocidades diarias a 50 y 100 metros de altura muestra que la velocidad del viento es consistentemente mayor a 100 metros, lo que refuerza la ventaja de utilizar aerogeneradores más altos.

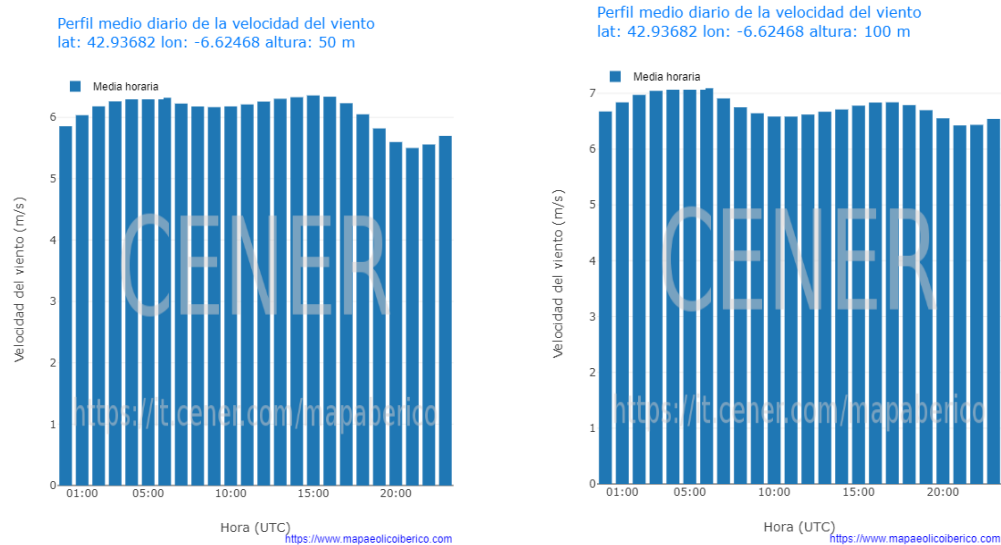


Ilustración 14: Perfil medio diario de la velocidad del viento a 50 – 100 metros en la Moredina

Fuente: Mapa Eólico Ibérico

En resumen, los resultados indican que ambas ubicaciones tienen un recurso eólico significativo, aunque Degaña presenta velocidades de viento promedio ligeramente superiores a diferentes alturas. Este análisis de rugosidad y perfil de velocidades respalda la elección de alturas optimizadas para los aerogeneradores, maximizando la eficiencia y producción de energía del parque eólico.

4 SELECCIÓN DE AEROGENERADORES

Para la selección de los aerogeneradores adecuados para el proyecto de 6MW, se han considerado varios factores técnicos y estratégicos clave. La diversidad de productores en el mercado de aerogeneradores ofrece una amplia gama de opciones, lo que permite un análisis comparativo más exhaustivo y la selección de la mejor opción según las necesidades del proyecto.

4.1 Criterios de selección

La elección de los aerogeneradores es un proceso crucial para el éxito del proyecto, ya que influye directamente en la eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad del parque eólico. En este apartado, se describen los criterios que guiarán la selección de los aerogeneradores más adecuados.

- Productor y marca

En este contexto, se ha optado por evaluar aerogeneradores de dos prestigiosas marcas: Gamesa y Enercon. Gamesa, una empresa española con un fuerte reconocimiento en la industria de la energía eólica, y Enercon, una marca alemana conocida por su innovación y calidad en el diseño y fabricación de aerogeneradores. Esta comparación permite considerar tanto productos nacionales como internacionales, asegurando una decisión precisa y equilibrada.

- Potencia nominal

Al tratarse de una instalación de 6MW, se han decidido estudiar aerogeneradores con potencias nominales de 2MW y 3MW. Este criterio se ha seleccionado arbitrariamente para analizar dos opciones y posibilitar un mejor análisis comparativo de las distintas soluciones disponibles en el mercado. La elección de diferentes capacidades permite una evaluación detallada de las ventajas y desventajas de cada modelo, considerando factores como la eficiencia energética, la adecuación a las condiciones del sitio, los costos de instalación y mantenimiento, y la compatibilidad con las infraestructuras locales.

- Factores técnicos

Altura del buje y longitud de las palas. La altura del buje y la longitud de las palas son cruciales para maximizar la captación de energía del viento. Aerogeneradores más altos y con palas más largas pueden capturar vientos más fuertes y constantes.

Condiciones del Sitio. La elección del aerogenerador debe considerar las condiciones específicas del sitio, incluyendo la velocidad y dirección del viento, la rugosidad del terreno y las condiciones meteorológicas.

Tecnología y Eficiencia. La tecnología empleada en la conversión de energía eólica a eléctrica y la eficiencia general del sistema son factores determinantes. Aerogeneradores con tecnología avanzada y alta eficiencia garantizarán una mayor producción de energía y menores pérdidas.

En resumen, la selección de aerogeneradores para este proyecto de 6MW se basará en un análisis detallado de aerogeneradores de 2MW y 3MW de la marca Gamesa para garantizar la viabilidad y el éxito del parque eólico.

4.2 Características de los aerogeneradores

En este apartado, se analizarán y compararán dos modelos de aerogeneradores para determinar cuál es el más adecuado para la instalación eólica de 6MW. Los modelos considerados son el Gamesa G114-2.0MW y el Enercon E-115 3.000. A continuación, se presenta una descripción detallada y una comparación de estos aerogeneradores en términos de sus características técnicas y operativas.

- **Gamesa G114-2.0MW**

El Gamesa G114-2.0MW es un aerogenerador con una capacidad de generación de energía de 2MW. Sus principales características son:

Tabla 1: Ficha técnica Gamesa G114-2.0MW

Hoja de Datos de Energía		Hélice	
Potencia nominal	2.000 kW	Diámetro	114 m
Velocidad del viento	2,5 m/s	Superficie del rotor	10.270 m ²
Velocidad nominal del viento	10 m/s	Número de hojas	3
Velocidad del viento de corte	25 m/s	Velocidad, máx.	16 U/min
Velocidad del viento de supervivencia	60 m/s	Velocidad de punta	96 m/s
Caja de cambios		Designación del tipo	55,5
Planear	Spur/Planetary	Esencial	GFK
Alturas	3	Fabricante	Gamesa
Traducción	1:80	Densidad de potencia 1	195,9 W/m ²
Fabricante	Echesa (Gamsea Group)/Hansen/Bosch Rexroth/Winergy	Grupo Electrónico	
		Planear	Double Fed Asyn
Torre		Número	1
Altura del buje	990/120/140 m	Velocidad, máx.	1.280 U/min
Planear	Steel tube/Concrete	Voltaje	690 V
Moldear	Conical	Conexión a la red	IGBT
Protección anticorrosiva	Painted	Frecuencia de red	50/60 Hz
Fabricante	Gamesa	Fabricante	Cantarey (Gamesa Group)/ABB/Indar
Otros			
Offsshore	No	Onshore	Sí

Fuente: Elaboración propia a partir de <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/428-gamesa-g114-2.0mw>

Este modelo será utilizado en una configuración de tres unidades para alcanzar la potencia total de 6MW. La densidad de potencia y el perfil de potencia del G114-2.0MW indican una eficiencia adecuada para zonas con velocidades medias de viento.

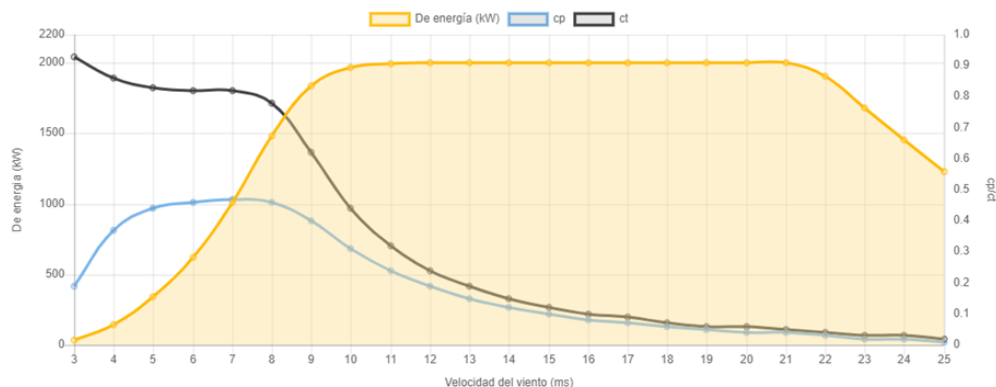


Ilustración 15: Curva de potencia de la turbina G114-2.0MW

Fuente: Wind-Turbine-Models <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/428-gamesa-g114-2.0mw>

Enercon E-115 3.000

El Enercon E-115 3.000 es un aerogenerador con una capacidad de generación de energía de 3MW. Sus principales características son:

Tabla 2: Ficha técnica Enercon E-115 3.000

Hoja de Datos de Energía				Hélice	
Potencia nominal	3.000 kW	Diámetro	115,7 m		
Velocidad del viento	2 m/s	Superficie del rotor	10.515,5 m ²		
Velocidad nominal del viento	11,5 m/s	Número de hojas	3		
Velocidad del viento de corte	25 m/s	Velocidad, máx.	12,8 U/min		
Velocidad del viento de supervivencia	60 m/s	Velocidad de punta	78 m/s		
Torre		Esencial	GFK/Epoxy		
Altura del buje	92/135/149 m	Densidad de potencia1	285,3 W/m ²		
Planear	Steel tube Concrete	Densidad de potencia2	3,5 m ² /kW		
Moldear	Conical	Grupo Electrónico			
Protección anticorrosiva	Painted	Planear	Synchronous multi-pole		
Otros		Número	1		
Onshore	Sí	Velocidad, máx.	12,8 U/min		
Offshore	No	Voltaje	69V		
Nota: Todos los componentes son fabricados por Enercon		Conexión a la red	IGBT		

Fuente: Elaboración propia a partir de <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/832-enercon-e-115-3.000>

Este modelo será utilizado en una configuración de dos unidades para alcanzar la potencia total de 6MW. Su mayor potencia nominal permite una mayor generación de energía por unidad instalada.

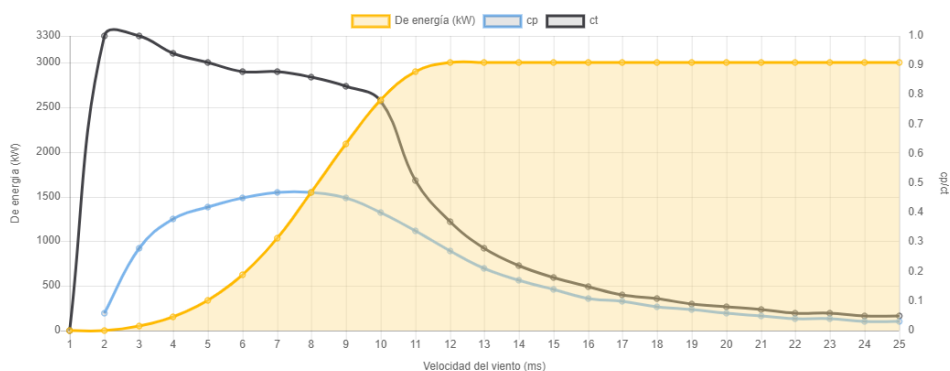


Ilustración 16: Curva de potencia de la turbina E-115 3.000

Fuente: Wind-Turbine-Models <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/832-enercon-e-115-3.000>

Ambos aerogeneradores presentan características robustas y adecuadas para la instalación propuesta, pero tienen diferencias clave que pueden influir en la decisión final:

- Capacidad de generación. La Enercon E-115 3.000 tiene una mayor capacidad nominal (3MW) en comparación con la Gamesa G114-2.0MW (2MW). Esto significa que se necesitarían menos unidades de Enercon para alcanzar la misma capacidad instalada.
- Diámetro y superficie del rotor. El rotor del Enercon E-115 es ligeramente más grande, con un diámetro de 115.7 m y una superficie de 10,515.5 m², en comparación con el Gamesa G114 que tiene un diámetro de 114.0 m y una superficie de 10,207.0 m². Un rotor más grande generalmente permite capturar más energía del viento.
- Velocidad nominal del viento. La velocidad nominal del viento es más alta para el Enercon E-115 (11.5 m/s) comparada con el Gamesa G114 (10.0 m/s). Esto indica que el Enercon podría ser más eficiente en zonas con velocidades de viento más altas.
- Altura del buje. Ambos modelos ofrecen diferentes alturas de buje, lo que proporciona flexibilidad en función de las características del terreno y las condiciones de viento locales.
- Densidad de potencia. La densidad de potencia del rotor del Enercon es mayor, lo que sugiere una mayor eficiencia en la conversión de la energía del viento en electricidad.
- Configuración y mantenimiento. Utilizar menos unidades de mayor capacidad (como el Enercon E-115) puede simplificar la instalación y el mantenimiento, reduciendo potencialmente los costos operativos a largo plazo.
- Perfiles de potencia. Ambos aerogeneradores muestran diferencias en la producción de energía a diferentes velocidades del viento. El perfil de potencia del Gamesa G114-2.0MW es adecuado para áreas con velocidades medias de viento, mientras que el Enercon E-115 3.000, con su mayor capacidad y eficiencia a velocidades más altas, puede ofrecer un mejor rendimiento en sitios con condiciones de viento más fuertes y consistentes.

La elección entre el Gamesa G114-2.0MW y el Enercon E-115 3.000 dependerá de las condiciones específicas del sitio y las prioridades del proyecto. Si la zona presenta velocidades de viento más altas, el Enercon E-115

puede ofrecer mayores beneficios debido a su mayor capacidad y eficiencia. Sin embargo, el Gamesa G114-2.0MW, siendo un producto nacional, podría ofrecer ventajas en términos de logística, soporte técnico y cumplimiento de políticas nacionales de fomento de la industria local. Ambas opciones son viables y la decisión final debería basarse en un análisis técnico y económico detallado, que se abordará en el siguiente apartado.

4.3 Análisis técnico y económico para la selección de aerogeneradores

En esta sección, se llevará a cabo un análisis destinado a evaluar la capacidad de generación de energía y los costos asociados con las diferentes configuraciones de aerogeneradores consideradas para el proyecto. La selección del aerogenerador óptimo reviste una importancia crítica para maximizar tanto la eficiencia como la rentabilidad de la instalación. Para ello, se procederá a un examen detallado de la energía producida en cada uno de los casos planteados, tomando en consideración variables fundamentales como la velocidad y dirección del viento, la temperatura media anual, la altitud, entre otras.

Además, se realizará un análisis de los costos asociados a la adquisición e instalación de los aerogeneradores, proporcionando así una visión clara de la viabilidad económica de cada alternativa. Este análisis integral permitirá tomar decisiones informadas respecto a la configuración que mejor se ajuste tanto a criterios de eficiencia energética como a consideraciones financieras.

Es importante reconocer que es posible que contenga ciertos errores o limitaciones que puedan influir en la fiabilidad de las conclusiones obtenidas. Aunque se han empleado herramientas y métodos científicos adecuados, es fundamental tener en cuenta que la experiencia y el conocimiento técnico-profesional adquiridos con la práctica y la especialización en el campo son aspectos que pueden no estar completamente desarrollados en el contexto académico.

Por lo tanto, es prudente ejercer cierta precaución al interpretar los resultados de este análisis, ya que pueden estar sujetos a sesgos o simplificaciones que podrían no reflejar completamente la complejidad y las variables dinámicas involucradas en la toma de decisiones respecto a la selección de aerogeneradores para proyectos reales. Asimismo, la falta de experiencia práctica en la implementación de proyectos energéticos a gran escala podría limitar la capacidad del estudiante para anticipar y abordar ciertos desafíos operativos, logísticos o financieros que podrían surgir en la práctica.

4.3.1 Producción energética

Para calcular la energía producida en cada caso, se ha empleado la plataforma *Windenergie-Daten der Schweiz*, dirigida por la Oficina Federal Suiza de la Energía, utilizando los datos previamente obtenidos sobre el recurso eólico en nuestra zona de estudio. Estos datos se han integrado en el modelo de simulación para estimar la producción de energía de cada configuración de aerogeneradores.

A continuación, se presenta la proyección de generación de energía para cada escenario, considerando las variables de velocidad y dirección del viento, así como la temperatura media anual, altitud, parámetro de forma de Weibull, velocidad media, altura y clase de rugosidad.

La siguiente tabla incluye los datos de la potencia nominal total generada, calculada a partir de la potencia nominal por unidad obtenida en la simulación para cada tipo de aerogenerador. Estos valores permiten una comparación directa entre las distintas configuraciones propuestas, facilitando la evaluación de la opción más eficiente y adecuada para el proyecto.

Tabla 3: Energía total producida en un año

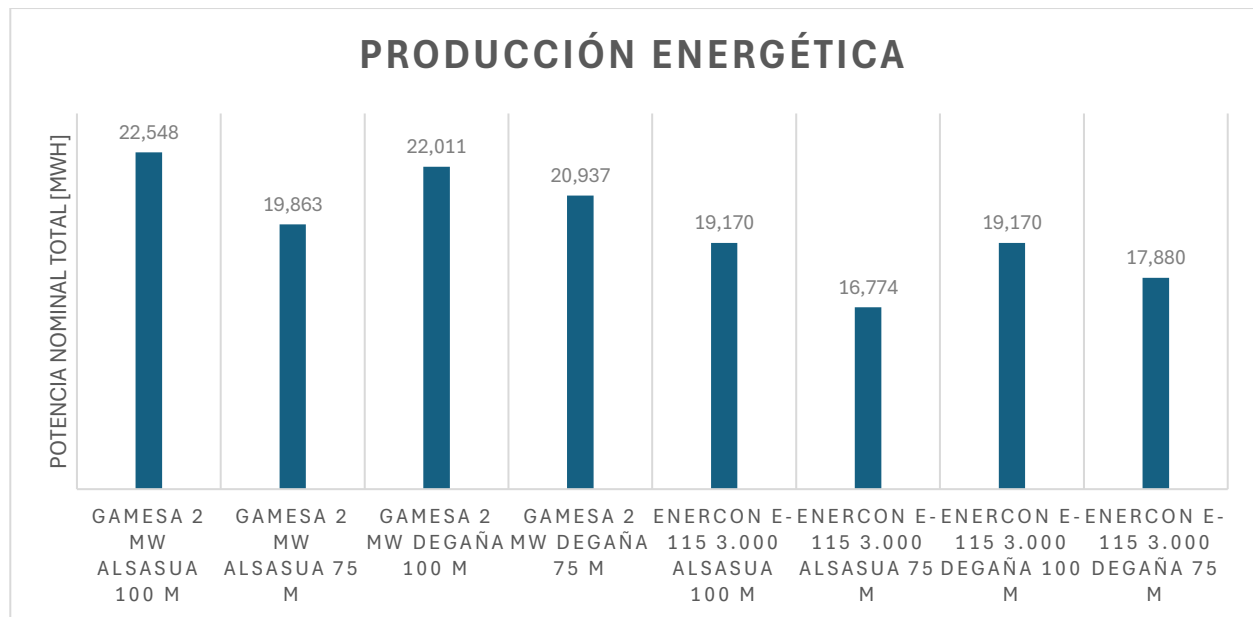
	Cantidad	Energía producida (kWh)	Energía producida total (kWh)	Energía producida total (MWh)
Gamesa 2 MW Alsasua 100 m	3	7.515.889	22.547.667	22.548

Gamesa 2 MW Alsasua 75 m	3	6.621.140	19.863.420	19.863
Gamesa 2 MW Degaña 100 m	3	7.336.939	22.010.817	22.011
Gamesa 2 MW Degaña 75 m	3	6.979.039	20.937.117	20.937
E-115 3.000 Alsasua 100 m	2	9.584.984	19.169.968	19.170
E-115 3.000 Alsasua 75 m	2	8.386.861	16.773.722	16.774
E-115 3.000 Degaña 100 m	2	9.584.984	19.169.968	19.170
E-115 3.000 Degaña 75 m	2	8.939.841	17.879.682	17.880

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de *Windenergie-Daten der Schweiz*

La siguiente gráfica representa la energía total generada por cada configuración y ubicación:

Gráfica 1: Comparativa de la energía producida anual



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de *Windenergie-Daten der Schweiz*

Al comparar los resultados de producción energética de los aerogeneradores Gamesa G114-2.0MW y Enercon E-115 3.000 en distintas ubicaciones y alturas, se observa una tendencia clara en cuanto a eficiencia y capacidad de generación.

En Alsasua a 100 metros de altura, tanto el Gamesa G114-2.0MW como el Enercon E-115 3.000 muestran una alta producción energética, beneficiándose de la favorable velocidad media del viento en esta ubicación. Sin embargo, el Enercon E-115 3.000 tiende a tener una ligera ventaja debido a su mayor capacidad nominal y

eficiencia a mayores alturas. Esta mayor capacidad le permite captar más energía del viento, resultando en una producción más elevada.

Cuando se reduce la altura a 75 metros en Alsasua, ambos modelos experimentan una disminución en la producción energética. No obstante, el Gamesa G114-2.0MW sigue mostrando un rendimiento sólido, aunque con una menor eficiencia comparado con su desempeño a 100 metros. El Enercon E-115 3.000, a pesar de la reducción en altura, mantiene una producción robusta gracias a su diseño eficiente que le permite adaptarse mejor a alturas más bajas que el Gamesa.

En Degaña a 100 metros de altura, los resultados son comparables a los de Alsasua a 100 metros. El Gamesa G114-2.0MW mantiene una producción energética consistente y elevada, reflejando su capacidad de operar eficientemente en distintas ubicaciones. Por otro lado, el Enercon E-115 3.000 sigue destacando con una producción alta debido a su mayor capacidad y optimización para aprovechar las condiciones del viento en diferentes terrenos.

Al reducir la altura a 75 metros en Degaña, la producción energética de ambos modelos disminuye. El Gamesa G114-2.0MW sigue siendo eficiente, aunque con una reducción en la captación de energía debido a la menor altura. El Enercon E-115 3.000 también muestra una disminución en la producción, pero se mantiene más efectivo comparativamente, aprovechando su diseño superior y mayor capacidad para generar energía.

Conclusiones del análisis:

- Impacto de la altura. La altura de instalación tiene un impacto significativo en la producción energética de ambos modelos. La reducción de 100 metros a 75 metros resulta en una disminución notable de la energía generada para ambas turbinas, aunque el Enercon E-115 3.000 muestra una mejor adaptabilidad a menores alturas.
- Comparación de modelos. El Enercon E-115 3.000, con su mayor capacidad nominal, generalmente supera al Gamesa G114-2.0MW en términos de producción energética en todas las ubicaciones y alturas. Su diseño le permite una mayor eficiencia, especialmente en condiciones óptimas de viento.
- Ubicación. Ambos modelos mantienen una producción energética robusta en las dos ubicaciones (Alsasua y Degaña), con el Enercon E-115 3.000 destacando ligeramente más debido a su capacidad de captar más energía del viento.
- Configuración y mantenimiento: Utilizar menos unidades de mayor capacidad, como el Enercon E-115, puede simplificar la instalación y el mantenimiento, reduciendo potencialmente los costos operativos a largo plazo.

4.3.2 Análisis económico

En esta sección, se procede a un análisis detallado de los costos asociados con las diferentes configuraciones de aerogeneradores consideradas para el proyecto. Este análisis económico se complementa con la evaluación de la producción energética previamente realizada para determinar la configuración más viable desde un punto de vista financiero.

Para el cálculo del presupuesto, se han tenido en cuenta por separado los costos de la turbina por unidad y los costos de instalación y mantenimiento. Esta separación permite una evaluación más precisa de los gastos asociados con cada tipo de aerogenerador y su implementación.

La siguiente tabla presenta los datos de costos, desglosados en costos de la turbina, instalación y mantenimiento:

Tabla 4: Coste turbina

Potencia turbina (kW)	2000	3000
Precio por kW (\$/kW)	850	800

Número de turbinas	3	2
Precio por turbina (\$)	1.700.000	2.400.000
Coste (\$)	5.100.000	4.800.000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Coste instalación y mantenimiento

Metros altura	100	75	100	75
Potencia, kW	2000	2000	3000	3000
\$/kW (O+M)	700	600	750	650
\$/N Turbinas	1.400.000	1.200.000	2.250.000	1.950.000
Número turbinas	3	3	2	2
Coste Instalación, \$	4.200.000	3.600.000	4.500.000	3.900.000

Fuente: Elaboración propia

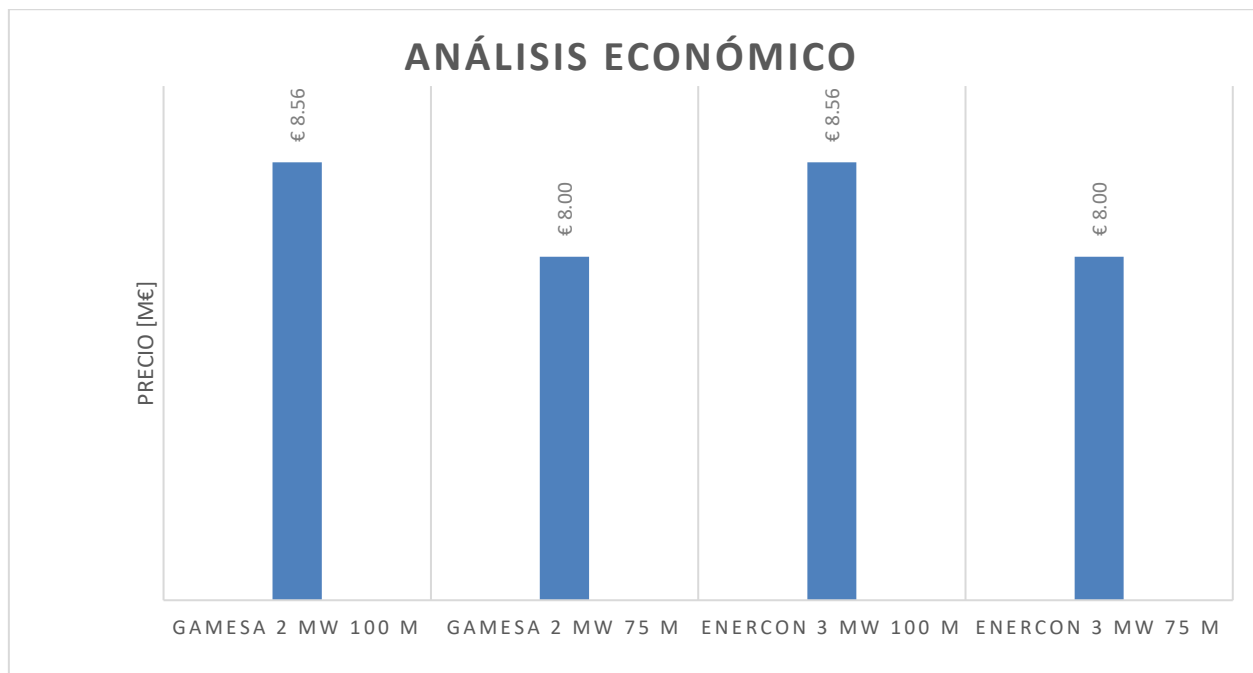
Tabla 6: Comparativa coste total

	Turbinas	Instalación/Mantenimiento	Coste total (\$)	Coste total (€)
Gamesa 2 MW Alsasua 100 m	5.100.000	4.200.000	9.300.000	8.556.000
Gamesa 2 MW Alsasua 75 m	5.100.000	3.600.000	8.700.000	8.004.000
Gamesa 2 MW Degaña 100 m	5.100.000	4.200.000	9.300.000	8.556.000
Gamesa 2 MW Degaña 75 m	5.100.000	3.600.000	8.700.000	8.004.000
E-115 3.000 Alsasua 100 m	4.800.000	4.500.000	9.300.000	8.556.000
E-115 3.000 Alsasua 75 m	4.800.000	3.900.000	8.700.000	8.004.000
E-115 3.000 Degaña 100 m	4.800.000	4.500.000	9.300.000	8.556.000
E-115 3.000 Degaña 75 m	4.800.000	3.900.000	8.700.000	8.004.000

Fuente: Elaboración propia

Además, se incluye una gráfica comparativa que ilustra los costos totales de cada configuración de aerogeneradores, facilitando la comparativa.

Gráfica 2: Análisis económico



Fuente: Elaboración propia

Los costos totales para todas las configuraciones son bastante similares, rondando los 9,3 millones de dólares para las instalaciones a 100 metros y 8,7 M\$ para las instalaciones a 75 metros. Esto muestra una diferencia de aproximadamente 600.000 \$ entre las dos alturas para ambas marcas. En cuanto a las turbinas, el precio de la Gamesa 2 MW es más alto que para la Enercon E-115 3.000 debido a la diferencia en el número de turbinas necesarias. Sin embargo, el costo total de las turbinas es más alto para Gamesa debido a la mayor cantidad requerida. Los costos de instalación y mantenimiento para las turbinas Enercon E-115 son ligeramente más altos que los de Gamesa debido a la mayor complejidad y capacidad de las turbinas Enercon.

La reducción en la altura de 100 metros a 75 metros genera una reducción en los costos de instalación y mantenimiento. Sin embargo, esto también afecta la producción energética, por lo que debe evaluarse cuidadosamente el balance entre costo y producción. Los costos de instalación y mantenimiento para las turbinas Enercon E-115 son ligeramente más altos que los de Gamesa debido a la mayor complejidad y capacidad de las turbinas Enercon.

Conclusiones del análisis económico:

- Viabilidad financiera. Ambas configuraciones (Gamesa y Enercon) presentan costos totales similares, lo que sugiere que, desde una perspectiva puramente económica, cualquiera de las dos podría ser viable dependiendo de otros factores como la producción energética y las condiciones específicas del sitio.
- Preferencia por alturas menores. La configuración a 75 metros es más económica en términos de costos de instalación y mantenimiento, lo cual podría ser preferible si las pérdidas en producción energética no son significativas.
- Simplificación Operativa. Utilizar menos unidades de mayor capacidad, como en el caso de Enercon E-115, puede simplificar la logística y el mantenimiento, potencialmente reduciendo los costos operativos a largo plazo.

En resumen, aunque las diferencias de costos no son drásticas, la selección final debe considerar tanto los aspectos económicos como los técnicos.

5 ELECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LA INSTALACIÓN

Basándonos en el análisis combinado de la producción energética y los costos económicos, la elección del aerogenerador Gamesa G114-2.0MW a una altura de 100 metros en Alsasua, Navarra, puede justificarse por varios factores clave. En primer lugar, a 100 metros de altura, este modelo demuestra una alta producción energética, aprovechando las favorables condiciones del viento en Alsasua. Aunque el Enercon E-115 3.000 presenta una capacidad nominal mayor y podría generar más energía en términos absolutos, el Gamesa G114-2.0MW sigue siendo altamente eficiente en esta ubicación específica. Esta eficiencia se traduce en una robusta generación de energía que cumple con los objetivos del proyecto en términos de rendimiento.

Desde una perspectiva económica, los costos totales asociados con la configuración del Gamesa G114-2.0MW a 100 metros son competitivos. Aunque las configuraciones de 75 metros son ligeramente más económicas en términos de instalación y mantenimiento, la reducción en la producción energética hace que la altura de 100 metros sea preferible para maximizar la generación de energía sin incurrir en costos operativos significativamente más altos. Además, el uso de la tecnología Gamesa, ampliamente probada y confiable, asegura un mantenimiento simplificado y costes operativos sostenibles a lo largo del tiempo. Por lo tanto, al considerar tanto la viabilidad financiera como la eficiencia energética, la elección del aerogenerador Gamesa G114-2.0MW a 100 metros en Alsasua ofrece un balance óptimo entre costos y producción, garantizando un rendimiento efectivo y una inversión sólida para el proyecto eólico.

Una vez analizada la producción energética y los costos de los aerogeneradores según la zona y altura, se procede a estudiar las distintas alternativas para la disposición de los aerogeneradores dentro del parque eólico. Este estudio se basa en el recurso eólico de la zona, proporcionando una perspectiva clara sobre la topografía del terreno y la distribución del recurso eólico particularizadas para nuestra zona final de estudio en la Comunidad Foral de Navarra. La disposición de los aerogeneradores debe considerar la topografía del terreno, ya que la presencia de colinas, valles y otros accidentes geográficos pueden afectar la dirección y velocidad del viento, influenciando así la eficiencia de los aerogeneradores.

5.1 Estudio de optimización de la disposición de los aerogeneradores

El estudio de optimización de la disposición de los aerogeneradores tiene como objetivo maximizar la eficiencia del parque eólico y minimizar las pérdidas energéticas debidas a los efectos de estela y otras interferencias. Este proceso incluye la evaluación de diferentes configuraciones de distribución, teniendo en cuenta las características topográficas y el comportamiento del viento en cada zona.

Utilizando datos del recurso eólico obtenidos mediante simulaciones y el Mapa Eólico Ibérico del Centro Nacional de Energías Renovables, CENER, se pueden identificar las zonas con mayor velocidad y consistencia del viento dentro del parque. Esto permite situar los aerogeneradores en los puntos óptimos para maximizar la producción de energía.

En las siguientes imágenes se presentan las alternativas de distribución Este-Oeste y Norte-Sur, manteniendo la distancia de seguridad obligatoria entre ellos de tres veces el diámetro. Estas representaciones visuales permiten evaluar y comparar eficientemente las disposiciones propuestas, asegurando el cumplimiento de las normativas de seguridad y optimizando la eficacia del parque eólico. Además, se incluyen datos sobre las velocidades del viento medias asociadas a cada generador para una evaluación más completa.

- Distribución Este-Oeste:

Esta configuración alinea los aerogeneradores en dirección este-oeste, beneficiándose de la dirección predominante del viento. Las velocidades del viento son 8.9 m/s, 9.53 m/s y 11.65 m/s respectivamente. La distancia de seguridad de tres veces el diámetro del rotor se mantiene para minimizar los efectos de estela y asegurar una operación eficiente de las turbinas. Esta disposición maximiza la captación del recurso eólico y reduce las interferencias entre aerogeneradores.

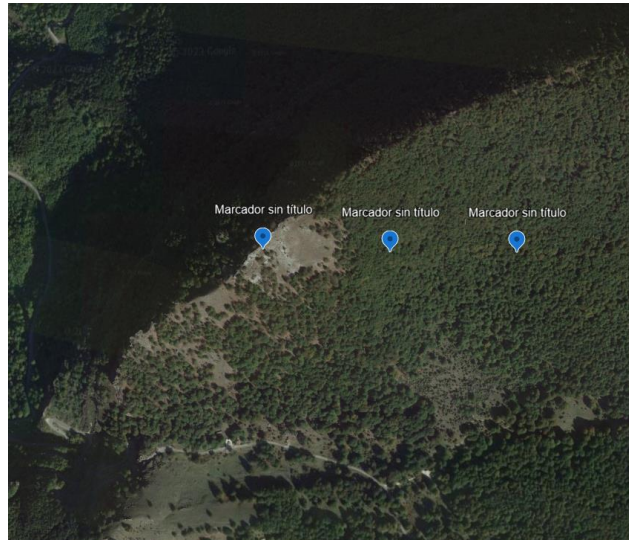


Ilustración 17: Aérea de la distribución este-oeste

Fuente: Google Maps

- Distribución Norte-Sur

Esta configuración alinea los aerogeneradores en dirección norte-sur, permitiendo un mejor aprovechamiento del recurso eólico durante todo el año en regiones donde la dirección del viento varía estacionalmente. Las velocidades del viento son 11.65 m/s, 8.40 m/s, 7.71 m/s respectivamente. Al igual que en la disposición este-oeste, se respeta la distancia de seguridad de tres veces el diámetro del rotor, asegurando la eficiencia operativa y minimizando los efectos de estela.

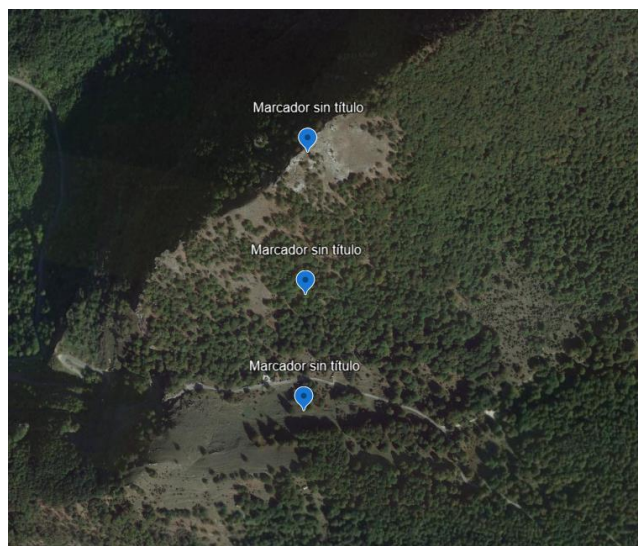


Ilustración 18: Aérea de la distribución norte-sur

Fuente: Google Maps

Finalmente, se presenta la disposición de los aerogeneradores aprovechando la topografía de la zona. Las velocidades del viento para esta disposición son 11.65 m/s, 11.55 m/s, 11.24 m/s. La disposición óptima se ve reducida en un par de puntos al aumentar la separación a la obligatoria por seguridad, pero se mantiene dentro de rangos eficientes y seguros para la operación del parque eólico.



Ilustración 19: Aérea distribución aprovechando topografía

Fuente: Google Maps

5.2 Resultados del diseño del parque eólico.

La configuración final del parque eólico se ha diseñado para maximizar la captación del recurso eólico, manteniendo una distancia de tres veces el diámetro del rotor entre los aerogeneradores, y minimizar los efectos adversos, como los de estela, asegurando así una operación eficiente. La disposición final de los aerogeneradores se basa en un análisis de las condiciones eólicas locales y la topografía del terreno, utilizando tanto datos empíricos como simulaciones avanzadas. Tres aerogeneradores se ubicarán estratégicamente para optimizar la captación de viento y minimizar las interferencias entre ellos. Estas ubicaciones han sido determinadas utilizando herramientas de geolocalización y análisis de recursos eólicos garantizando la distancia de seguridad adecuada entre las turbinas.

El análisis de la producción energética se basa en los datos específicos de viento para cada ubicación de los aerogeneradores, junto con sus características técnicas. Los resultados muestran que el aerogenerador más al oeste tiene una velocidad del viento promedio de 11.65 m/s, el aerogenerador central una velocidad de 11.55 m/s, y el aerogenerador más al este una velocidad de 11.24 m/s. Estos valores indican una alta eficiencia en la generación de energía. La suma de la producción energética de los tres aerogeneradores alcanza un total anual de 21.831.867 kWh.

En resumen, el diseño final del parque eólico, basado en un análisis detallado de la topografía y los recursos eólicos locales, presenta una disposición óptima de los aerogeneradores que maximiza la producción de energía y minimiza los efectos adversos. Esta configuración no solo asegura una alta eficiencia en la generación de energía, sino que también contribuye de manera significativa a la matriz energética nacional, garantizando la viabilidad operativa y económica del parque eólico a largo plazo.

6 ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA INSTALACIÓN

6.1 Detalle de los costos involucrados en la instalación y operación de la planta eólica

El análisis económico del proyecto de instalación de aerogeneradores en Alsasua, Navarra, se fundamenta en la evaluación detallada de los costos asociados a las diferentes etapas del proyecto, incluyendo la adquisición de turbinas, su instalación, y los costos de operación y mantenimiento a lo largo de la vida útil del parque eólico.

El primer componente significativo en el desglose de costos es la adquisición de los aerogeneradores. Para este proyecto, se ha seleccionado el modelo Gamesa G114-2.0MW, cuyo costo es de 1.700.000 dólares por unidad. Habiendo instalado tres para cumplir con la potencia requerida en la instalación. Esta inversión inicial incluye el costo de fabricación, siendo el mayor desembolso debido a la complejidad y tamaño de los componentes necesarios para los aerogeneradores.

Los costos de instalación del Gamesa G114-2.0MW ascienden a 4.200.000 dólares. Estos gastos incluyen el transporte, la construcción de las bases y torres, la conexión de las turbinas a la red eléctrica, y la integración de los sistemas de control. También se consideran los gastos asociados con el estudio del terreno y la preparación de la infraestructura necesaria para soportar las turbinas.

Una vez instalados, los aerogeneradores requieren un mantenimiento regular para asegurar su funcionamiento eficiente y prolongar su vida útil. El costo anual de mantenimiento para cada Gamesa G114-2.0MW es de 120.000 dólares. Estos costos abarcan inspecciones periódicas, reparaciones, y el reemplazo de componentes desgastados, así como el monitoreo continuo de la producción de energía y la gestión administrativa del parque eólico.

Sumando los costos de adquisición e instalación, el costo total del proyecto para la instalación del Gamesa G114-2.0MW en Alsasua a 100 metros de altura es de 9.300.000 dólares, equivalente a 8.556.000 euros. Con un gasto en mantenimiento anual de \$360.000. Es importante destacar que estos costos no incluyen otros posibles gastos adicionales, como los costos financieros, legales y regulatorios, los cuales no se han considerado en este estudio.

Tabla 7: Coste del parque

	Turbina (\$)	Instalación (\$)	Mantenimiento (\$)	Coste total (\$)	Coste total (€)
Gamesa 2 MW Alsasua 100 m	5.100.000	4.200.000	360.000	9.300.000	8.556.000

Fuente: Elaboración propia

6.2 Análisis de rentabilidad

En esta sección se utilizarán diversas herramientas financieras y modelos de análisis para evaluar la viabilidad económica del proyecto.

El parque eólico en Alsasua tiene una producción anual estimada de 21.831.867 kWh. Para calcular las ganancias, utilizaremos un precio razonable del kWh, considerando que la electricidad generada se destina a la venta. Suponiendo un precio de 0,10 euros por kWh, las ganancias anuales serían de 2.183.186,70 €

Estas ganancias anuales representan los ingresos brutos del parque eólico, que servirán como base para evaluar la rentabilidad del proyecto mediante varios indicadores financieros.

- **Valor Actual Neto:**

El Valor Actual Neto (VAN) es un indicador que se utiliza para determinar la viabilidad económica de un proyecto. Calcula la diferencia entre el valor presente de los flujos de caja futuros generados por el proyecto y la inversión inicial. Un VAN positivo indica que el proyecto es rentable y se espera que genere más valor del que cuesta.

Para calcular el VAN, se deben descontar los flujos de caja futuros a una tasa de descuento específica, que refleja el costo de oportunidad del capital. La fórmula del VAN es:

$$VAN = \sum \left(\frac{R_t}{(1+i)^t} \right) - I$$

donde:

R_t es el flujo de caja neto en el año t ,

i es la tasa de descuento,

t es el número de años,

I es la inversión inicial.

- **Tasa Interna de Retorno:**

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es otro indicador financiero importante. Representa la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. En otras palabras, la TIR es la tasa de rentabilidad que se espera obtener del proyecto. Un proyecto es considerado viable si la TIR es mayor que el costo de capital o la tasa mínima de retorno requerida.

La TIR se puede encontrar resolviendo la siguiente ecuación:

$$0 = \sum \left(\frac{F_t}{(1+TIR)^t} \right) - I$$

donde:

F_t es el flujo de caja neto en el año t ,

r es la tasa de descuento,

t es el número de años,

I es la inversión inicial.

- **Período de recuperación de la inversión:**

El período de recuperación de la inversión es el tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial a través de los flujos de caja generados por el proyecto. Este indicador proporciona una medida de la rapidez con que el proyecto comenzará a generar beneficios netos. Un período de recuperación más corto es generalmente preferible, ya que reduce el riesgo y mejora la liquidez.

Para calcular el período de recuperación, se suman los flujos de caja anuales hasta que el total acumulado iguale la inversión inicial. El año en el que esto ocurre es el período de recuperación.

6.3 Discusión sobre la viabilidad económica

Tabla 8: Análisis de la inversión

Año	Gastos (\$)	Ingresos (\$)	Cashflow (\$)	Acumulado (\$)	Acumulado(€)
0	9.300.000		- 9.300.000	- 9.300.000	- 8.556.000,00
1	360.000	2.183.186,70	1.823.186,70	- 7.476.813,30	- 6.878.668,24
2	360.000	2.183.186,70	1.823.186,70	- 5.653.626,60	- 5.201.336,47
3	360.000	2.183.186,70	1.823.186,70	- 3.830.439,90	- 3.524.004,71
4	360.000	2.183.186,70	1.823.186,70	- 2.007.253,20	- 1.846.672,94
5	360.000	2.183.186,70	1.823.186,70	- 184.066,50	- 169.341,18
6	360.000	2.183.186,70	1.823.186,70	1.639.120,20	1.507.990,58

Fuente: Elaboración propia

La inversión inicial de \$9.300.000 en la planta eólica genera ingresos anuales de \$2.183.186,70 y gastos anuales de \$360.000, resultando en un cashflow anual de \$1.823.186,70. El periodo de recuperación de la inversión es de aproximadamente 5 años, lo cual es razonable para proyectos de energía renovable. La TIR calculada del 4,84% es algo baja comparada con los rangos típicos para inversiones en energía eólica, que suelen estar entre 5% y 10% para proyectos onshore. Sin embargo, esta TIR podría ser aceptable si la inversión es parte de una estrategia más amplia de diversificación, se espera que los costos de capital se mantengan bajos, o existen incentivos adicionales o se prevé una apreciación del valor del proyecto a largo plazo. Aunque la TIR es baja en comparación con otros proyectos de energía, la inversión puede ser rentable bajo ciertas condiciones específicas del mercado y la estrategia del grupo inversor.

Al calcular el Valor Actual Neto (VAN) de la inversión utilizando una tasa de descuento del 5%, el resultado es de -\$46.066. Un VAN negativo indica que, a la tasa de descuento del 5%, la inversión no recupera su costo inicial ajustado por el valor del dinero en el tiempo, es decir, no generaría suficiente retorno para superar la tasa de descuento. Esto sugiere que la inversión no es rentable si el costo de capital es del 5%. Subsidios o incentivos gubernamentales podrían mejorar el VAN, así como asegurar financiamiento a un costo menor que el 5%. En conclusión, con un VAN de aproximadamente -\$46.066, la inversión no parece ser rentable bajo las condiciones actuales y la tasa de descuento del 5%. Sería recomendable revisar los supuestos, buscar formas de optimizar costos o incrementar ingresos, o evaluar si existen incentivos adicionales que puedan cambiar la viabilidad de la inversión.

7 IMPACTO AMBIENTAL

La evaluación del impacto ambiental (EIA) es un proceso fundamental para identificar y analizar los efectos significativos que un proyecto puede tener sobre el medio ambiente antes de su autorización. Este análisis incluye una amplia gama de factores, como la población, la salud humana, la flora, la fauna, la biodiversidad, la geodiversidad, el suelo, el subsuelo, el aire, el agua, el clima, el paisaje, y el patrimonio cultural, así como la interacción entre todos estos elementos.

Para un proyecto como el parque eólico en Alsasua, Navarra, la EIA es crucial no solo para cumplir con las normativas legales, sino también para garantizar que el desarrollo sea sostenible y respetuoso con el entorno natural y las comunidades locales. Un análisis exhaustivo de los impactos potenciales y la implementación de medidas de mitigación adecuadas son esenciales para minimizar los efectos negativos y maximizar los beneficios ambientales y socioeconómicos.

7.1 Evaluación del impacto ambiental

El parque eólico en Alsasua, Navarra, presenta una serie de efectos potenciales sobre el entorno natural y las comunidades locales. A continuación, se detallan los principales impactos identificados, particularizados para nuestra área de estudio:

- Impacto sobre la biodiversidad:

El desarrollo del parque eólico puede afectar significativamente a la fauna local. Alsasua se encuentra cerca de dos parques naturales, Aizkorri-Aratz y Aralar, que son hábitats de especies protegidas y vulnerables. Entre la fauna más destacable de estas áreas se encuentran aves rapaces como buitres leonados, quebrantahuesos, halcones abejeros, milanos reales, águilas culebreras, alcotanes y alimoches. También hay mamíferos importantes como osos pardos y aves terrestres como perdices pardillas y urogallos. La colisión con las aspas de los aerogeneradores representa una amenaza directa para estas especies, especialmente para las aves en vuelo. Además, la construcción y operación del parque pueden causar perturbaciones en los hábitats naturales, afectando tanto a la flora como a la fauna autóctonas.

- Impacto sobre el suelo y agua:

La construcción de las infraestructuras necesarias para el parque eólico, como caminos y plataformas, puede ocasionar la alteración del suelo y la vegetación. Esto, a su vez, puede llevar a la erosión y cambios en los patrones de drenaje del agua, afectando la calidad de los recursos hídricos locales. La cercanía a áreas protegidas aumenta la sensibilidad del terreno, requiriendo un manejo cuidadoso para evitar la degradación del suelo y la contaminación de las fuentes de agua.

- Impacto sobre el paisaje:

Los aerogeneradores, debido a su tamaño y visibilidad, pueden alterar significativamente el paisaje natural de Alsasua. Esta región es conocida por sus vistas panorámicas y su belleza natural, y la presencia de aerogeneradores puede tener repercusiones estéticas. Esto puede afectar la percepción visual del entorno por parte de los residentes y visitantes, reduciendo el atractivo turístico de la zona.

- Impacto acústico:

El funcionamiento de los aerogeneradores genera ruido, que puede afectar a las comunidades locales y la fauna. Aunque el nivel de ruido es generalmente bajo, su persistencia puede ser una fuente de molestia para los habitantes cercanos. En zonas rurales y naturales como Alsasua, donde el ruido ambiental es bajo, el impacto del ruido generado por los aerogeneradores puede ser más perceptible.

- Impacto socioeconómico:

El proyecto también puede tener efectos positivos, como la creación de empleo durante la fase de construcción y operación, y la generación de ingresos para la comunidad local a través de impuestos y arrendamientos. Navarra es una comunidad que está desarrollando tecnología eólica, lo que conlleva beneficios económicos y energéticos.

Sin embargo, también pueden surgir preocupaciones sobre la equidad en la distribución de estos beneficios y el impacto en las actividades tradicionales de la región, como la agricultura y el turismo rural.

7.2 Propuestas de medidas de mitigación y compensación

Para minimizar y compensar los impactos ambientales negativos del parque eólico en Alsasua, se proponen las siguientes acciones:

Medidas de mitigación:

1. Protección de la fauna:

Implementar sistemas de detección y apagado de aerogeneradores para reducir las colisiones de aves y murciélagos.

Colaborar con organizaciones de conservación para monitorear y proteger las especies vulnerables.

2. Gestión del suelo y agua:

Establecer medidas de control de erosión, como la revegetación de áreas perturbadas y la construcción de barreras de sedimentos.

Diseñar sistemas de drenaje adecuados para evitar la alteración de los cursos de agua naturales.

Utilizar técnicas de construcción de bajo impacto para minimizar la perturbación del suelo.

3. Reducción del impacto paisajístico:

Utilizar colores y materiales que se integren mejor con el entorno natural.

Plantar vegetación alrededor de las instalaciones para reducir la visibilidad de las infraestructuras.

4. Control del ruido:

Instalar aerogeneradores con tecnologías de reducción de ruido y realizar monitoreos periódicos del nivel sonoro.

Establecer zonas de amortiguamiento entre los aerogeneradores y las áreas residenciales.

Medidas de compensación:

1. Compensación ecológica:

Restaurar hábitats degradados en áreas cercanas para compensar la pérdida de biodiversidad.

Crear corredores ecológicos para facilitar el movimiento de la fauna afectada.

Implementar programas de reforestación y conservación en colaboración con parques naturales cercanos.

2. Beneficios a la comunidad local:

Invertir en proyectos comunitarios, como infraestructura local y programas educativos, utilizando parte de los ingresos generados por el parque eólico.

Establecer programas de formación y empleo para los residentes locales, asegurando una participación equitativa en los beneficios del proyecto.

Promover el turismo sostenible y las actividades recreativas vinculadas al parque eólico.

Estas medidas están diseñadas para asegurar que el parque eólico en Alsasua no solo minimice su impacto ambiental, sino que también contribuya positivamente al desarrollo sostenible de la región, respetando su riqueza natural y cultural.

7.3 Reciclaje de palas de aerogeneradores

Según WindEurope, la agencia eólica europea, en los próximos cinco años, alrededor de 14.000 palas podrían ser desmanteladas en todo el continente, lo que supondría entre 40.000 y 60.000 toneladas de residuos. Por este motivo, el reciclaje de las palas eólicas, con una vida útil de entre 20 y 25 años, se vislumbra como uno de los retos fundamentales de la industria.

La Asociación Empresarial Eólica (AEE) advierte que uno de cada tres aerogeneradores que hay en España puede quedar obsoleto en los próximos años y, por tanto, tendría que ser desinstalado. Datos facilitados por la patronal señalan que en el territorio nacional hay 4.157 aerogeneradores instalados antes de 2001, los cuales podrían ser objeto de repotenciación durante esta década. Dado que cada aerogenerador cuenta con tres palas, unos 7.500 aerogeneradores podrían dejar de funcionar. Actualmente, en España hay 1.345 parques eólicos en más de 800 municipios, con más de 22.000 aerogeneradores y más de 66.000 palas instaladas. De los aerogeneradores que están instalados en España, un 36% (unos 7.500) se instalaron antes de 2005 y, por lo tanto, tienen 15 años o más. Esto supone que más de 20.000 palas podrían tener que ser desinstaladas en los próximos años. España dispone del 100% de la cadena de valor de la energía eólica y cuenta con más de 250 centros industriales, repartidos en 16 de las 17 comunidades autónomas.

Existen varias tecnologías emergentes y métodos innovadores para el reciclaje de palas de aerogeneradores, que incluyen:

Método mecánico. Este proceso implica el triturado de las palas para su reutilización en materiales de construcción, como cemento y mortero. Este método es eficaz para reducir el volumen de residuos y reutilizar materiales compuestos, convirtiéndolos en recursos valiosos para la industria de la construcción.

Método térmico. Utiliza altas temperaturas para descomponer los materiales compuestos en sus componentes básicos. Esta técnica permite recuperar fibras y otros materiales que pueden ser reutilizados en la fabricación de nuevas palas o en otras industrias, ofreciendo una solución sostenible para la gestión de residuos.

Método químico. Implica el uso de productos químicos para disolver las resinas y separar las fibras de vidrio y carbono. Este método es prometedor por su capacidad de recuperar materiales de alta calidad. Aunque aún se encuentra en fases de desarrollo y optimización, presenta un gran potencial para el reciclaje eficiente y la reutilización de componentes de alta calidad.

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) ha adjudicado 186 millones de euros en ayudas del PRTR -fondos NextGenEU- para 172 proyectos, enmarcados en el programa de REPOTENCIACIÓN CIRCULAR, que busca mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de instalaciones eólicas e hidroeléctricas. Este programa también impulsa soluciones de economía circular para el reciclaje de componentes de aerogeneradores, generando más de 6.800 empleos directos e indirectos.

Acciona, por su parte, desarrollará la planta Waste2Fiber en Lumbier, Navarra, con una adjudicación de 5,25 millones de euros. Este proyecto, en colaboración con Acciona Energía y RenerCycle, ha sido declarado de interés foral, lo que acelerará su tramitación y desarrollo. La planta comenzará su construcción este año y se espera que esté operativa a finales de 2025, empleando a más de 100 personas. Además, tendrá una capacidad de procesamiento de 6.000 toneladas de material al año, abarcando todas las etapas del proceso productivo. La tecnología propia de tratamiento térmico que se utilizará permitirá conservar las propiedades de las fibras de refuerzo, reutilizar las fracciones orgánicas y transformar los materiales compuestos en materias primas secundarias de alta calidad. Así, contribuirá a una producción industrial más sostenible y eficiente, evitando las cargas medioambientales derivadas tanto de la obtención de material virgen como del desecho del material de entrada.

Iberdrola y FCC, a través de su empresa conjunta EnergyLoop, han recibido una adjudicación de 2,89 millones de euros. La planta se ubicará en La Ribera, Navarra, una ubicación estratégica cerca de algunos de los primeros parques eólicos del país. Se espera que esta iniciativa cree alrededor de 100 empleos directos e indirectos, con una inversión total cercana a los 10 millones de euros. Esta planta se centrará en el reciclaje de palas de aerogeneradores, compuestas principalmente por fibras de vidrio, carbono y resinas, valorizando estos materiales

como materias primas secundarias en diversos sectores como el energético, aeroespacial, automovilístico, textil, químico y de la construcción. Este proyecto cuenta con el apoyo del Gobierno de Navarra y la sociedad pública Sodena, posicionando a la región a la vanguardia del sector de energías renovables.

Finalmente, Naturgy ha sido seleccionada con una adjudicación de 1,49 millones de euros para desarrollar una instalación piloto de reciclaje de palas de aerogeneradores en Almazán, Soria. Esta planta será escalable y replicable en otros emplazamientos, y se centrará en la recuperación de la fibra de vidrio de palas, cubrebujes y capotas, reincorporando este material al mercado. Además, la instalación implementará procesos innovadores para asegurar la eficiencia y sostenibilidad del reciclaje de estos componentes, contribuyendo a la economía circular en la industria eólica.

8 CONCLUSIONES

8.1 Recapitulación de los principales hallazgos del estudio

El presente estudio ha revelado varios hallazgos significativos que subrayan la importancia de aumentar la producción energética, especialmente a través de fuentes renovables. En el contexto energético actual, la energía eólica emerge como una de las apuestas más prometedoras a nivel mundial, destacando su capacidad para generar energía limpia y sostenible. En particular, la energía eólica offshore presenta un gran potencial de crecimiento, requiriendo una inversión significativa en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), un área en la que España puede desempeñar un papel crucial. Mientras tanto, la energía eólica onshore, aunque ya desarrollada, aún tiene margen para mejorar su eficiencia y producción.

El diseño de la instalación eólica ha demostrado ser fundamental para optimizar la captación del recurso eólico. La ubicación y el análisis de vientos han permitido identificar los mejores sitios para la instalación de aerogeneradores, lo cual es crucial para maximizar la producción energética. En este sentido, se ha resaltado la importancia de la caracterización detallada del recurso eólico, incluyendo la distribución de frecuencias y la rosa de vientos, así como el perfil de velocidades y la rugosidad del terreno.

La selección de aerogeneradores es otro aspecto clave, donde los criterios de selección y las características técnicas y económicas juegan un papel esencial. El análisis ha mostrado que, aunque los proyectos eólicos pueden no ser siempre rentables como inversión puramente financiera, sus beneficios ambientales y su contribución a la sostenibilidad energética justifican su implementación.

La elección y distribución óptima de los aerogeneradores en el parque eólico son fundamentales para maximizar la eficiencia y la producción energética. Este estudio ha subrayado la necesidad de una planificación cuidadosa y una coordinación efectiva entre el sector público y privado para fomentar la implementación de proyectos eólicos. Tal colaboración es vital para superar barreras regulatorias, económicas y tecnológicas que actualmente limitan el pleno desarrollo del potencial eólico.

En cuanto a los aspectos económicos, se ha detallado los costos involucrados en la instalación y operación de la planta eólica, y se ha realizado un análisis de rentabilidad y viabilidad económica. Aunque estos proyectos pueden no ser rentables desde una perspectiva estrictamente financiera, su valor debe ser evaluado también por sus beneficios ambientales y su contribución a la sostenibilidad energética.

Uno de los aspectos más innovadores y cruciales abordados es el reciclaje de palas de aerogeneradores. Este emergente sector tiene un gran margen de crecimiento y es especialmente relevante para España, que ha hecho una apuesta decidida por desarrollar tecnologías y métodos eficientes para el reciclaje de estos componentes. Este enfoque no solo contribuye a la economía circular, sino que también reduce el impacto ambiental de la industria eólica.

Finalmente, la evaluación del impacto ambiental y la propuesta de medidas de mitigación y compensación son esenciales para garantizar que el desarrollo de la energía eólica se realice de manera sostenible y responsable. Estas medidas son vitales para proteger el medio ambiente y las comunidades locales, asegurando un equilibrio entre el desarrollo energético y la conservación ambiental.

En resumen, el estudio pone de relieve que, aunque existen desafíos significativos, la energía eólica ofrece una oportunidad inigualable para avanzar hacia un futuro energético más sostenible y resiliente.

8.2 Reflexión sobre la viabilidad global del proyecto

La evaluación de la viabilidad global del proyecto de la planta eólica muestra resultados positivos en términos técnicos y ambientales, aunque presenta desafíos económicos que requieren atención y apoyo.

Desde una perspectiva técnica, la viabilidad del proyecto está sólidamente respaldada por la elección de aerogeneradores de gran fiabilidad y probada eficiencia en el mercado. Estos aerogeneradores han demostrado un rendimiento consistente y duradero en diversas condiciones operativas, lo que garantiza la estabilidad y eficiencia

del proyecto a lo largo del tiempo. La tecnología empleada no solo maximiza la producción energética, sino que también minimiza los tiempos de inactividad y los costos de mantenimiento, lo cual es crucial para la sostenibilidad técnica del parque eólico.

En términos económicos, el análisis revela que, como inversión financiera, el proyecto presenta una rentabilidad inferior al 5% de TIR (Tasa Interna de Retorno), lo que lo hace menos atractivo en comparación con otras alternativas de inversión. Este bajo retorno financiero se debe, en parte, a la dificultad de encontrar ubicaciones óptimas, ya que las mejores localizaciones ya han sido ocupadas por proyectos anteriores. No obstante, es esencial destacar que la rentabilidad económica no es el único factor que considerar. El apoyo a estos proyectos es crucial debido a sus beneficios a largo plazo en términos de sostenibilidad energética y reducción de emisiones de carbono. La inversión en energía eólica, aunque no sea la más lucrativa financieramente, es indispensable para avanzar hacia un futuro energético más limpio y sostenible. Por lo tanto, la coordinación entre el sector público y privado, junto con políticas de incentivos y subsidios, es fundamental para superar estas barreras económicas.

Desde el punto de vista ambiental, la viabilidad del proyecto es notable. La implementación de medidas de mitigación y compensación es vital para minimizar el impacto ambiental durante la construcción y operación del parque eólico. La adopción de prácticas sostenibles y tecnologías avanzadas en el reciclaje de palas de aerogeneradores destaca como un componente crucial de la estrategia ambiental del proyecto.

En conclusión, aunque el proyecto enfrenta desafíos económicos significativos, su viabilidad técnica y ambiental es sólida. La energía eólica representa una oportunidad inigualable para avanzar hacia una matriz energética más sostenible, y es esencial que se continúe apoyando y desarrollando estos proyectos, no solo por sus beneficios financieros, sino por su contribución indispensable a la lucha contra el cambio climático y la promoción de un desarrollo sostenible.

8.3 Recomendaciones para futuras investigaciones o desarrollos

Para fortalecer y ampliar el conocimiento en el campo de la energía eólica y la sostenibilidad energética, se proponen las siguientes recomendaciones:

Una de las áreas clave para futuras investigaciones es el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías para el reciclaje de las palas de aerogeneradores. Actualmente, el reciclaje de estos componentes es un desafío debido a la composición compleja de las palas, que incluye fibras de vidrio y resinas. Investigar y desarrollar métodos más eficientes y sostenibles para el reciclaje puede no solo reducir el impacto ambiental, sino también generar nuevas oportunidades económicas al transformar residuos en recursos valiosos para otras industrias.

Además, es fundamental investigar alternativas renovables complementarias a la energía eólica, dado que esta no es una fuente constante de energía debido a la variabilidad del viento. La integración de diversas fuentes de energía renovable, como la solar, la hidroeléctrica y la geotérmica, puede proporcionar una solución más equilibrada y estable para satisfacer la demanda energética. La investigación en almacenamiento de energía también es crucial para abordar la intermitencia inherente de las energías renovables y asegurar un suministro constante de electricidad.

Otro aspecto importante es la necesidad de una fuerte apuesta por la energía eólica offshore. Esta tecnología ofrece un gran potencial de crecimiento debido a la disponibilidad de recursos eólicos más fuertes y constantes en alta mar. Sin embargo, el desarrollo de tecnología avanzada es esencial para hacer frente a los desafíos específicos del entorno offshore, como la profundidad del lecho marino, resistencia a condiciones climáticas adversas y la minimización del impacto ambiental. Fomentar la innovación en tecnologías de construcción, mantenimiento y operación de parques eólicos marinos puede consolidar esta fuente de energía como un pilar fundamental de la matriz energética renovable.

Finalmente, es imperativo fomentar la colaboración entre entidades públicas y privadas para desarrollar políticas y marcos regulatorios que apoyen la expansión sostenible de la energía eólica. La coordinación entre gobiernos, industrias y comunidades locales puede facilitar la implementación de proyectos eólicos, asegurar el financiamiento adecuado y promover prácticas sostenibles. Esta colaboración también puede impulsar la creación de incentivos y subsidios que hagan más atractiva la inversión en energías renovables, superando las barreras económicas y acelerando la transición hacia un futuro energético más limpio y sostenible.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency. (2020). World Energy Outlook 2020. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- [2] BloombergNEF. (2024). New Energy Outlook 2024. Recuperado de <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>
- [3] IPCC. (2019). Informe especial sobre el calentamiento global de 1.5 °C. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- [4] Iberdrola. (2021). El futuro de la energía: El reto de la descarbonización. Recuperado de https://www.iberdrola.com/wcorp/gc/prod/es_ES/informe-integrado/2021/informe-integrado/futuro-energia.html
- [5] ONU. (2015). Acuerdo de París. Recuperado de <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- [6] Global Wind Energy Council. (2024). Global Wind Report. Recuperado de <https://gwec.net/>
- [7] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2024). IDAE. Recuperado de <https://www.idae.es/>
- [8] Global Wind Energy Council. (2023). Global Wind Report 2024. Recuperado de <https://gwec.net/global-wind-report-2023/>
- [9] Global Wind Energy Council. (2024). Global Wind Report 2024. Recuperado de <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>
- [10] IRENA. (2024). Future of Wind Report. Recuperado de <https://www.irena.org/publications/2024/Jan/Future-of-Wind>
- [11] Boletín Oficial del Estado. (2023). Real Decreto 150/2023, de 28 de febrero, por el que se aprueban los planes de ordenación del espacio marítimo de las cinco demarcaciones marinas españolas. Recuperado de https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-5704
- [12] Cluster de Energía. (2024). Energía eólica. Recuperado de <https://www.clusterenergia.com/energia-eolica>
- [13] Cluster de Energía. (2024). Wind energy in the Basque Country. Recuperado de <https://www.clusterenergia.com/wind-energy-basque-country>
- [14] Cluster de Energía. (2024). Offshore wind in the Basque Country. Recuperado de <https://www.clusterenergia.com/offshore-wind-basque-country>
- [15] Wind-Turbine-Models.com. (2024). Gamesa G114-2.0MW. Recuperado de <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/428-gamesa-g114-2.0mw>
- [16] Wind-Turbine-Models.com. (2024). Enercon E-115 3.000. Recuperado de <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/832-enercon-e-115-3.000>
- [17] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). Zonificación ambiental para energías renovables. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/evaluacion-ambiental/zonificacion_ambiental_energias_renovables.html
- [18] Boletín Oficial del Estado. (2013). Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Recuperado de <https://www.boe.es/eli/es/l/2013/12/09/21>

[19] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). El MITECO adjudica 185,7 millones en ayudas para la repotenciación eólica. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2023/10/el-adjudica-185-7-millones-en-ayudas-para-repotenciacion-eolica-.html>

[20] 20 Minutos. (2023). Iberdrola, FCC, Naturgy y Acciona arrancan reciclaje de palas en España. Recuperado de <https://www.20minutos.es/lainformacion/empresas/iberdrola-fcc-naturgy-acciona-arrancan-reciclaje-palas-espana-5275290/>

[21] LM Wind Power. (2024). Blade recycling. Recuperado de <https://www.lmwindpower.com/en/sustainability/blade-recycling>

[22] Siemens Gamesa. (2021). Reciclaje de palas. Recuperado de <https://www.siemensgamesa.com/en-int/-/media/siemensgamesa/downloads/en/sustainability/environment/siemens-gamesa-20210901-recycleblade-infographic-finalen.pdf>

[23] Iberdrola. (2024). Reciclaje de palas eólicas. Recuperado de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/reciclaje-palas-eolicas>

[24] Acciona. (2023). Acciona construirá planta pionera de reciclado de palas eólicas en Navarra. Recuperado de https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/acciona-construira-planta-pionera-reciclado-palas-eolicas-navarra/?_adin=11734293023

[25] TudelaHoy. (2024). Arranca la construcción de la planta de reciclaje de palas de aerogeneradores en Cortes. Recuperado de <https://www.tudelahoy.com/articulo/comercio-empresa/arranca-construccion-planta-reciclaje-palas-aerogeneradores-cortes/20240416101253045537.html>

[26] Iberdrola. (2023). EnergyLoop instalará su innovadora planta de reciclaje de palas en España con el apoyo de Perseo. Recuperado de <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/energyloop-instalara-su-innovadora-planta-de-reciclaje-de-palas-en-espana-con-el-apoyo-de-perseo>