



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Impacto logístico y análisis económico de costes sobre la
implementación de técnicas de inspección no destructivas
en el sector de la energía eólica

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Avanzada de Producción,
Logística y Cadena de Suministro

AUTOR/A: Garrido Gómez, Raquel

Tutor/a: Lario Femenia, Joan

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

INDICE

Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Objetivo del proyecto	1
1.2 Motivación del proyecto.....	2
1.3 Estructura del documento	3
Capítulo 2 Energía Eólica.....	5
2.1 Energía Eólica - Concepto	5
2.2 Energía Eólica Terrestre y Energía Eólica Marina	6
2.3 Cadena de Suministro de la fabricación de aerogeneradores	10
2.4 Evolución de la Energía Eólica en la Unión Europea.....	12
2.4.1. Energía Renovable Marina en la Unión Europea	13
2.4.2. Evolución de los precios de las fuentes de energía	15
2.4.3. Dependencia de la Unión Europea del suministro de combustibles fósiles.....	17
2.4.4. Objetivos y progresos respecto al uso de Energías Renovables.....	19
Capítulo 3 Técnicas de Inspección No Destructivas	21
3.1 Técnicas de Inspección No Destructivas - Concepto	21
3.2 Tipos de Técnicas de Inspección No Destructivas	22
3.3 Importancia de las Técnicas de Inspección No Destructivas en el Sector Eólico	25
3.4 Evolución de la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas en el Sector de la Energía Eólica.....	26
3.4.1. Procesos de producción e implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas	27
3.4.2. Ejemplo de caso de inspección de un proceso de pintura de Torres Eólicas bajo la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas.....	29
Capítulo 4 Impacto logístico sobre la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas en el Sector Eólico - Revisión literaria	31
4.1 Revisión de la literatura	31
4.1.1. Metodología.....	32
4.1.2. Resultados.....	32
4.1.3. Análisis y síntesis.....	34
4.2 Estado actual sobre el impacto logístico por la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas en el Sector Eólico	39

Capítulo 5 Análisis económico de costes	51
5.1 Costes asociados a la fabricación de Torres Eólicas	51
5.2 Costes asociados a la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas	57
5.3 Comparación entre la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas Manual y Automatizada	63
Capítulo 6 Objetivos de Desarrollo Sostenible y Energía Eólica.....	65
CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Parque Eólico terrestre. Fuente: Iberdrola (2021).....	6
Ilustración 2. Potencial de energía renovable eólica terrestre en la UE. Fuente: European Commission (2022).	7
Ilustración 3. Potencial de energía renovable eólica marina en la UE. Fuente: European Commission (2022).	9
Ilustración 4. Cadena de Valor de la industria eólica. Fuente: MINCOTUR (2019).	10
Ilustración 5. Cadena de suministro de la fabricación de aerogeneradores. Fuente: MINCOTUR (2019).	12
Ilustración 6. Potencial técnico de la energía eólica marina en cuencas marinas accesibles a los países de la UE27. Fuente: European Commission (2020).	14
Ilustración 7. Evolución del precio del gas en la última década en Europa. Fuente: Statista (2024). ...	16
Ilustración 8. Mapa Europeo de infraestructuras eléctricas. Fuente: European Commission (2022)...	18
Ilustración 9. Técnica de inspección visual. Fuente: SCI (2024).	22
Ilustración 10. Técnica de inspección con ultrasonido. Fuente: SCI (2024).	23
Ilustración 11. Técnica de inspección con radiografía. Fuente: SCI (2024).	23
Ilustración 12. Técnica de inspección con partículas magnéticas. Fuente: SCI (2024).	24
Ilustración 13. Técnica de inspección con líquidos permanentes. Fuente: SCI (2024).	25
Ilustración 14. Diagrama de las estrategias tradicionales de calidad. Fuente: Powell et al. (2022).	28
Ilustración 15. Diagrama de las estrategias ZDM. Fuente: Powell et al. (2022).	28
Ilustración 16. Defectos de pintura en una torre eólica (A) inclusión, (B) poro, (C) rayones, (D) delaminación y (E) arrugado. Fuente: Lario et al. (2023).	29
Ilustración 17. Detección de inclusión de datos invisibles. Fuente: Lario et al. (2023).	30
Ilustración 18. Inspección visual realizada por trabajadores. Fuente: Dimitrova et al. (2020)	42
Ilustración 19. Inspección visual realizada por drones. Fuente: Dimitrova et al. (2020).	43
Ilustración 20. Proceso de producción de torres eólicas. Fuente: GLWN (2014).	52
Ilustración 21. Desglose de costes totales de cada proveedor en porcentaje. Fuente: GLWN (2014).	53
Ilustración 22. Desglose de costes de cada proveedor por materiales en porcentaje. Fuente: GLWN (2014).	54
Ilustración 23. Desglose del coste de mano de obra de cada proveedor en porcentaje. Fuente: GLWN (2014).	56
Ilustración 24. Rangos de porcentaje de los costes de material inventariado. Fuente: Heizer & Render (2004).	62
Ilustración 25. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: ONU (2024).	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados obtenidos en las bases de datos tras la primera búsqueda. Fuente: Elaboración propia.	33
Tabla 2. Resultados obtenidos en las bases de datos tras la segunda búsqueda. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 3. Artículos seleccionados. Fuente: Elaboración propia.	35
Tabla 4. Puntos clave tratados en los artículos. Fuente: Elaboración propia.	46
Tabla 5. Tiempo de realización de cada etapa en el proceso de producción de una torre eólica. Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída de GLWN (2024).	52
Tabla 6. Ventas anuales y Torres construidas en 2021 por EEUU, China y Alemania. Fuente: GLWN (2014).	53
Tabla 7. Tiempo total de inspección en función del número de trabajadores. Fuente: Elaboración propia extraída de GLWN (2024).	58
Tabla 8. Desglose de costes del equipo de inspección visual automatizada. Fuente: Elaboración propia.	59
Tabla 9. Desglose de costes de la inspección manual y automatizada del proceso de pintura. Fuente: Elaboración propia.	60
Tabla 10. Reducción del WIP en tiempo y costes al automatizar el proceso de inspección de pintura. Fuente: Elaboración propia.	61

RESUMEN

El sector de la energía eólica desempeña un papel fundamental en el mundo actual debido a su contribución significativa en la transición hacia fuentes de energía renovables más sostenibles y a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. La correcta aplicación de técnicas de inspección no destructivas en este sector es crucial para asegurar la eficiencia, reducir los tiempos de ciclo de los procesos y contribuir al desarrollo de los parques eólicos. Por ello, este Trabajo de Fin de Máster aborda un estudio sobre el impacto logístico y análisis económico de costes sobre la implementación de técnicas de inspección no destructivas en el sector de la energía eólica.

A través de una revisión sobre la evolución histórica y el estado actual del sector eólico y su relación con las energías renovables, evaluando cómo estas técnicas afectan la cadena de suministro y los procesos operativos en la fabricación y mantenimiento de aerogeneradores, se identifican los beneficios y mejoras que estas técnicas aportan. Por otra parte, se realiza una evaluación y análisis de los costes específicos de su implementación, tanto en modalidades manuales como automatizadas y la comparación entre ellas, obteniendo datos significativos como el retorno de la inversión y la rentabilidad a largo plazo de cada tipo de inspección, así como la mejora en los tiempos de procesos obtenida.

Con esta investigación se pretende contribuir al conocimiento en este campo tan importante al proporcionar una perspectiva integral y actualizada que ayude en la toma de decisiones estratégicas en la industria.

PALABRAS CLAVE

Energía Eólica, Técnicas de Inspección No Destructiva, Inspección Automatizada, Calidad, Sostenibilidad.

RESUM

El sector de l'energia eòlica exerceix un paper fonamental en el món actual degut a la seua contribució significativa en la transició cap a fonts d'energia renovables més sostenibles i a la reducció de la dependència dels combustibles fòssils. La correcta aplicació de tècniques d'inspecció no destructives en aquest sector és crucial per a assegurar l'eficiència, reduir els temps de cicle dels processos i contribuir al desenvolupament dels parcs eòlics. Per això, aquest Treball de Fi de Màster aborda un estudi sobre l'impacte logístic i l'anàlisi econòmica de costos sobre la implementació de tècniques d'inspecció no destructives en el sector de l'energia eòlica.

A través d'una revisió sobre l'evolució històrica i l'estat actual del sector eòlic i la seua relació amb les energies renovables, avaluant com aquestes tècniques afecten la cadena de subministrament i els processos operatius en la fabricació i manteniment d'aerogeneradors, s'identifiquen els beneficis i millores que aquestes tècniques aporten. D'altra banda, es realitza una avaluació i anàlisi dels costos específics de la seua implementació, tant en modalitats manuals com automatitzades i la comparació entre elles, obtenint dades significatives com el retorn de la inversió i la rendibilitat a llarg termini de cada tipus d'inspecció, així com la millora en els temps de processos obtinguda.

Amb aquesta investigació es pretén contribuir al coneixement en aquest camp tan important en proporcionar una perspectiva integral i actualitzada que ajude en la presa de decisions estratègiques en la indústria.

PARAULES CLAU

Energia Eòlica, Tècniques d'Inspecció No Destructiva, Inspecció Automatitzada, Qualitat, Sostenibilitat.

ABSTRACT

The wind energy sector plays a key role in today's world due to its significant contribution to the transition to more sustainable renewable energy sources and the reduction of dependence on fossil fuels. The correct application of non-destructive inspection techniques in this sector is crucial to ensure efficiency, reduce process cycle times and contribute to the development of wind farms. Therefore, this Master's Thesis deals with a study on the logistical impact and economic cost analysis of the implementation of non-destructive inspection techniques in the wind energy sector.

Through a review of the historical evolution and current state of the wind sector and its relationship with renewable energies, evaluating how these techniques affect the supply chain and operational processes in the manufacture and maintenance of wind turbines, the benefits and improvements that these techniques provide are identified. On the other hand, an evaluation and analysis of the specific costs of their implementation is carried out, both in manual and automated modalities and the comparison between them, obtaining significant data such as the return on investment and long-term profitability of each type of inspection, as well as the improvement in process times obtained.

This research aims to contribute to knowledge in this important field by providing a comprehensive and up-to-date perspective to assist strategic decision making in the industry.

KEYWORDS

Wind Energy, Non Destructive Inspection Techniques, Automated Inspection, Quality, Sustainability.

Capítulo 1 Introducción

En este capítulo de Introducción, se presentan los fundamentos y el contexto de este proyecto. Comenzando con el objetivo del proyecto, que establece las metas específicas que se pretenden alcanzar, y abordando aspectos como la motivación del proyecto y las razones subyacentes y la relevancia del estudio en el contexto actual del sector eólico. Finalmente, se describe la estructura del documento, proporcionando una visión general de los capítulos y secciones que conforman este trabajo, facilitando así la comprensión y el seguimiento de los contenidos presentados.

Con esta estructura, se pretende ofrecer una base sólida y comprensible para el análisis detallado que se desarrollará en los capítulos subsiguientes, destacando la importancia de las técnicas de inspección no destructivas y su impacto en la eficiencia operativa y la viabilidad económica del sector eólico.

1.1 Objetivo del proyecto

El objetivo principal de este trabajo de fin de máster es analizar el impacto logístico y realizar un análisis económico de costes sobre la implementación de técnicas de inspección no destructivas en el sector eólico.

Para ello, se investigará con el fin de comprender los siguientes objetivos planteados:

- Revisar la evolución histórica y el estado actual del sector eólico y el uso de las fuentes de energía renovables.
- Analizar cómo la introducción de técnicas de inspección no destructivas afecta en la cadena de suministro y en los procesos operativos de la fabricación y mantenimiento de aerogeneradores.
- Determinar los beneficios y mejoras que puede aportar la implementación de técnicas de inspección no destructivas.
- Evaluar los costes específicos relacionados con la implementación de técnicas de inspección no destructivas, tanto en modalidades manuales como automatizadas, y analizar aspectos como el retorno de la inversión y la rentabilidad a largo plazo de cada tipo de inspección.

1.2 Motivación del proyecto

La motivación detrás de este proyecto radica en la creciente importancia que ha adquirido en las últimas décadas la energía eólica como fuente de energía renovable y en la necesidad de garantizar la eficiencia y la fiabilidad de los aerogeneradores para maximizar su rendimiento y vida útil. Esto supone un aspecto fundamental en la transición hacia un sistema energético más sostenible y menos dependiente de los combustibles fósiles. La energía eólica, al ser una fuente limpia y abundante, contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al cumplimiento de los objetivos climáticos globales y de desarrollo sostenible. En este contexto, asegurar la eficiencia y fiabilidad de los aerogeneradores es esencial para maximizar su rendimiento y vida útil, factores clave para la rentabilidad y sostenibilidad económica del sector eólico.

Los aerogeneradores, como componentes fundamentales de los parques eólicos, deben operar en condiciones óptimas para garantizar una producción continua y eficiente de energía. Sin embargo, estos dispositivos están expuestos a diversas condiciones ambientales y operativas que pueden provocar desgaste y daños en sus componentes. La detección temprana de estos defectos es fundamental para prevenir fallos que podrían derivar en costosos tiempos de inactividad y reparaciones.

Para prevenir esto, la implementación de técnicas de inspección no destructivas permite evaluar la integridad de los componentes de los aerogeneradores sin causar daños, facilitando la identificación temprana de defectos y daños. Al implementar estas técnicas, se pueden prevenir fallos graves, minimizar los tiempos de inactividad no planificados y reducir significativamente los costes de producción y mantenimiento.

Por ello, este proyecto busca contribuir al avance del sector eólico mediante un análisis exhaustivo de las técnicas IND, considerando no solo su efectividad técnica, sino también su viabilidad económica y logística y además, contribuir a la sostenibilidad y rentabilidad del sector, alineándose con los objetivos globales de desarrollo sostenible y transición energética.

1.3 Estructura del documento

A partir de este punto, el presente trabajo de fin de máster está estructurado de la siguiente manera:

- Capítulo 2: Energía Eólica. Se presenta una introducción al concepto de energía eólica, se analiza la diferencia entre la energía eólica terrestre y marina, se explora la cadena de suministro de la fabricación de torres eólicas y se examina la evolución de la energía eólica en la Unión Europea.
- Capítulo 3: Técnicas de Inspección No Destructivas. Se define el concepto de técnicas de inspección no destructivas, se describen los diferentes tipos de técnicas disponibles, se discute su importancia en el sector eólico y se analiza la evolución de su implementación en el sector.
- Capítulo 4: Impacto Logístico sobre la Implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas en el Sector Eólico - Revisión Literaria. Se realiza una revisión de la literatura para analizar el estado actual sobre el impacto logístico de la implementación de técnicas de inspección no destructivas en el sector eólico.
- Capítulo 5: Análisis Económico de Costes. Se lleva a cabo un análisis detallado de los costes asociados a la implementación de técnicas de inspección no destructivas, incluyendo una comparativa entre técnicas automatizadas y manuales.
- Capítulo 6: Objetivos de Desarrollo Sostenible y Energía Eólica. Se examina la relación entre la energía eólica y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), destacando el papel de la energía eólica en la consecución de objetivos ambientales y sociales.
- Conclusiones. Se presentan las conclusiones obtenidas del estudio realizado y se ofrecen recomendaciones para futuras investigaciones en este ámbito.

Capítulo 2 Energía Eólica

En el contexto del desarrollo y la evolución del sector eólico, es fundamental comprender tanto los aspectos teóricos como prácticos que influyen en su funcionamiento y progreso, desde la comprensión de la energía eólica y sus distintas modalidades, tanto la terrestre como la marina, hasta la cadena de suministro de la fabricación de aerogeneradores y su integración en la Unión Europea (UE).

Por ello, este apartado aborda una serie de conceptos y temas clave a partir de los cuáles se explorarán las tendencias en la energía renovable marina en la UE, la evolución de los precios de las fuentes de energía y la dependencia de la Unión Europea de los combustibles fósiles. Asimismo, se examinarán los objetivos y los avances en el uso de energías renovables en la región.

2.1 Energía Eólica - Concepto

La Energía Eólica es un tipo de energía renovable que se genera mediante la transformación de la energía cinética producida por la fuerza del viento en energía eléctrica. El viento se genera por la existencia de distintos valores de presiones entre diferentes puntos de la tierra (Spiegeler & Cifuentes, 2016).

Para que el proceso de generación de energía eléctrica se realice se requiere de la instalación de parques eólicos, situados tanto en tierra como en mar. Los parques eólicos son instalaciones compuestas por una serie de turbinas eólicas dispuestas estratégicamente en áreas con vientos consistentes y fuertes (Ilustración 1). Estas turbinas están conectadas a una red eléctrica y se utilizan para generar energía eléctrica a gran escala. Cada turbina consta de una torre alta que sostiene un conjunto de palas o hélices que capturan la energía cinética del viento y la convierten en energía mecánica rotativa. Esta energía rotativa se transmite a un generador ubicado en la parte superior de la torre y se convierte en electricidad (Ventura & Hernández, 2019).



Ilustración 1. Parque Eólico terrestre. Fuente: Iberdrola (2021).

La energía eólica se ha convertido en una fuente de energía importante en muchos países debido a su capacidad para proporcionar electricidad limpia y renovable, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles.

2.2 Energía Eólica Terrestre y Energía Eólica Marina

La energía eólica, tanto terrestre como marina, ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, convirtiéndose en una pieza fundamental de la matriz energética global en la lucha contra el cambio climático y la transición hacia un sistema energético más sostenible. A continuación, se analiza la importancia de cada una de estas formas de energía eólica y su evolución en el sector.

La energía eólica terrestre (*onshore*) ha sido pionera en el desarrollo de la energía renovable a escala comercial. Su importancia radica en su amplia disponibilidad y en la madurez tecnológica alcanzada, lo que la convierte en una opción rentable y de rápida implementación para la generación de electricidad.

Los parques eólicos terrestres pueden desplegarse en una variedad de ubicaciones, desde zonas costeras hasta áreas rurales y urbanas, lo que aumenta su versatilidad y su potencial para contribuir a la seguridad energética y al desarrollo económico local.

La evolución de la energía eólica terrestre se ha caracterizado por avances tecnológicos que han permitido aumentar la eficiencia y reducir los costes de generación. La altura de los aerogeneradores

ha aumentado, permitiendo capturar vientos más constantes y de mayor velocidad, mientras que los diseños de las palas se han optimizado para maximizar la producción de energía. Además, la digitalización y la inteligencia artificial han permitido mejorar el rendimiento y la gestión de los parques eólicos, aumentando su fiabilidad y rentabilidad.

Hoy en día, la energía eólica terrestre representa una parte significativa de la capacidad de generación eléctrica de la UE, con parques eólicos distribuidos por toda Europa, como se puede observar en la Ilustración 2.

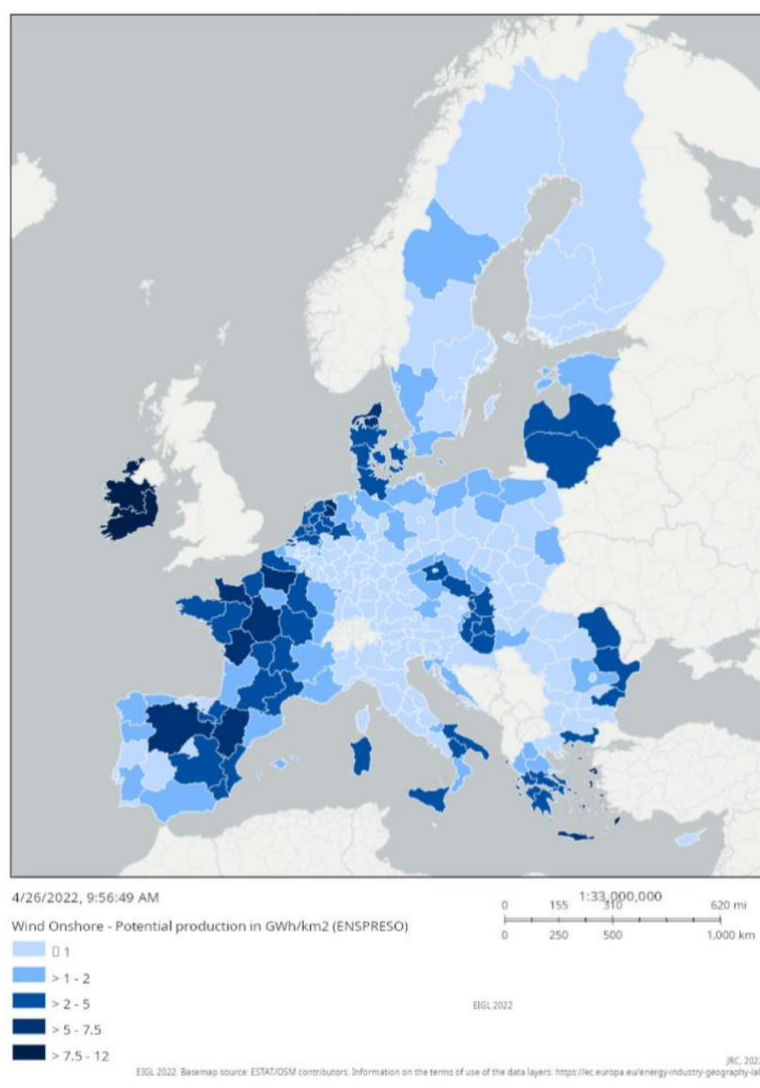


Ilustración 2. Potencial de energía renovable eólica terrestre en la UE. Fuente: European Commission (2022).

La energía eólica marina (*offshore*), por otro lado, representa una evolución natural de la energía eólica terrestre, aprovechando los vientos más constantes y fuertes que se encuentran en alta mar. Aunque aún se encuentra en una fase de desarrollo más temprana en comparación con la energía eólica terrestre, su potencial es enorme. Los parques eólicos marinos pueden desplegarse en aguas poco profundas cerca de la costa o en aguas profundas más alejadas, lo que ofrece una gran flexibilidad en su ubicación y un potencial de generación prácticamente ilimitado.

La importancia de la energía eólica marina radica en su capacidad para proporcionar una fuente de energía limpia y renovable a gran escala, contribuyendo de manera significativa a la descarbonización del sector energético y al cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, los parques eólicos marinos pueden integrarse con otras infraestructuras *offshore*, como plataformas petrolíferas o parques de acuicultura, maximizando el uso sostenible del espacio marino.

La evolución de la energía eólica marina ha sido impulsada por avances tecnológicos en diseño de turbinas, cimentaciones y sistemas de transmisión, así como por mejoras en la logística y la instalación *offshore*. Se han desarrollado nuevas tecnologías, como las turbinas flotantes, que permiten la instalación en aguas profundas donde no es viable utilizar cimentaciones fijas. Además, se han implementado estrategias innovadoras de financiación y colaboración público-privada para impulsar el desarrollo de proyectos a gran escala.

La UE, con sus extensas costas y áreas marinas, está bien posicionada para liderar el desarrollo de la energía eólica marina a nivel mundial. Si bien aún se encuentra en una etapa inicial, se ha registrado un rápido progreso y avance en los últimos años. La capacidad instalada de energía eólica marina ha aumentado considerablemente, tal y como se puede observar en la Ilustración 3, impulsada por proyectos piloto y programas de incentivos en varios países de la UE.

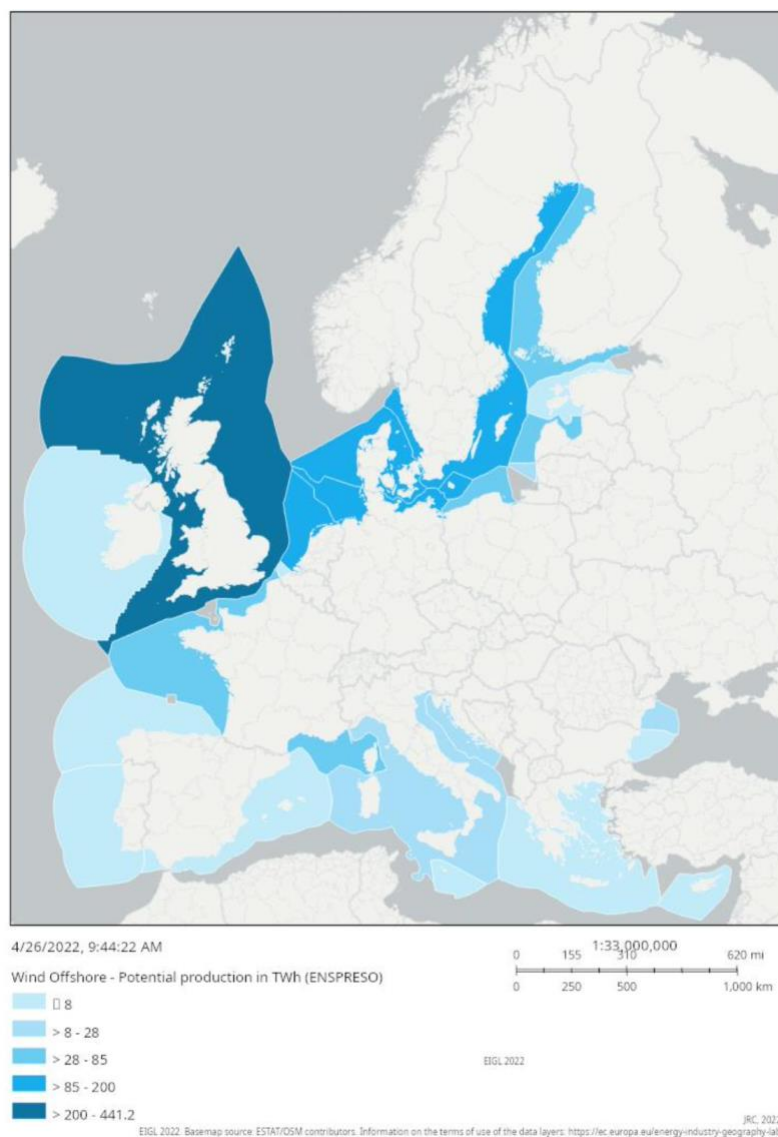


Ilustración 3. Potencial de energía renovable eólica marina en la UE. Fuente: European Commission (2022).

Tanto la energía eólica terrestre como la marina desempeñan un papel crucial en la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible. Su importancia radica en su capacidad para proporcionar una fuente de energía renovable y libre de emisiones, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y a la creación de un futuro energético más seguro y sostenible para las generaciones futuras (López, 2012).

2.3 Cadena de Suministro de la fabricación de aerogeneradores

La fabricación de aerogeneradores es una parte crucial de la cadena de suministro en la industria de la energía eólica y comprender esta cadena de suministro es esencial para evaluar la viabilidad y eficiencia de los proyectos eólicos.

En los últimos años, debido al estancamiento del mercado español y al crecimiento simultáneo del mercado internacional, las empresas han optado por internacionalizarse cada vez más. Este proceso ha involucrado estrategias diversas según el tamaño de la empresa y el tipo de actividad que realiza, ya sea fabricación de equipos, promoción de proyectos o prestación de servicios. Con ello, se ha potenciado el desarrollo de todas las actividades empresariales pertenecientes a la cadena de valor del mercado (Ilustración 4). España se encuentra entre los países líderes en el sector tanto por el desarrollo de la potencia instalada como por la existencia de proveedores de componentes y servicios complementarios y grandes profesionales (MINCOTUR, 2019).



Ilustración 4. Cadena de Valor de la industria eólica. Fuente: MINCOTUR (2019).

Un aerogenerador está compuesto por más de 8000 componentes diferentes. Su cadena de suministro comienza con la extracción y producción de los materiales necesarios para la construcción de las torres. Los materiales principales incluyen acero, cemento y fibra de vidrio, entre otros. El acero

es el componente principal de las torres eólicas debido a su resistencia y durabilidad. Se utiliza para fabricar la estructura principal de la torre, así como para las plataformas de acceso y otras partes estructurales. El cemento se utiliza a menudo para la cimentación de las torres en el suelo, proporcionando una base sólida y estable. La fibra de vidrio se utiliza para fabricar las palas de los aerogeneradores, que son montadas en la parte superior de la torre y capturan la energía del viento.

Una vez que se han producido los materiales, comienza el proceso de fabricación de las torres. Esto implica actividades como corte, doblado y soldadura del acero para formar la estructura de la torre. También se pueden agregar refuerzos y otros componentes para garantizar la resistencia y estabilidad de la torre. Por otro lado, se fabrican las palas de fibra mediante procesos de moldeo y laminación, que implican la colocación de capas de fibra de vidrio impregnadas con resina en moldes para dar forma a las palas.

Una vez que se han fabricado las torres y las palas, comienza la fase de ensamblaje. Esto implica la instalación de las palas en el rotor del aerogenerador y el montaje de la torre, que puede realizarse en el lugar de construcción o en una instalación cercana. Durante esta fase, también se instalan los sistemas eléctricos y mecánicos necesarios para que el aerogenerador funcione correctamente, como el generador, el sistema de control y los mecanismos de orientación.

Finalmente, una vez que se ha completado el ensamblaje, las torres eólicas están listas para ser transportadas e instaladas en el sitio de proyecto. Este proceso puede implicar el transporte terrestre o marítimo de las torres y el uso de grúas y equipos especiales para levantar las torres en su lugar final. Una vez instaladas, los aerogeneradores están listos para comenzar a generar electricidad a partir del viento (Ilustración 5).

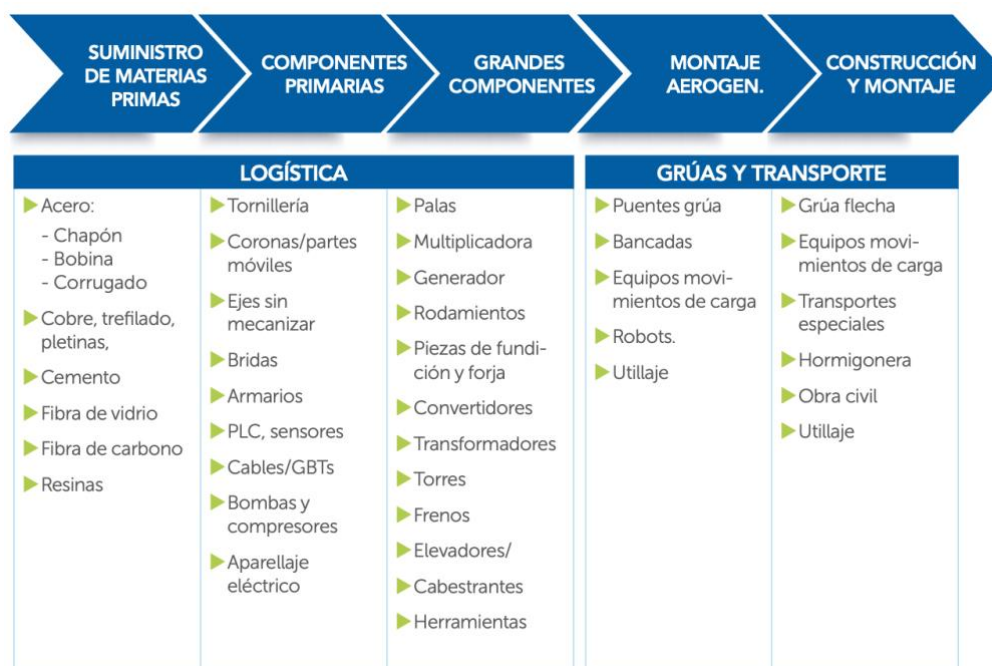


Ilustración 5. Cadena de suministro de la fabricación de aerogeneradores. Fuente: MINCOTUR (2019).

La cadena de suministro de la fabricación de aerogeneradores involucra la producción de materiales, la fabricación de componentes y la fase de ensamblaje y montaje, finalizando con la instalación de las torres en el sitio de proyecto. El correcto desarrollo de cada una de las etapas involucradas en este proceso es crucial para garantizar la calidad y el funcionamiento eficiente de los aerogeneradores.

2.4 Evolución de la Energía Eólica en la Unión Europea

En las últimas décadas, la energía eólica ha desarrollado un gran avance y crecimiento, lo cuál ha contribuido también de manera significativa al crecimiento general de las fuentes de energía renovable, con especial énfasis en el caso de la Unión Europea, en concreto en España y Francia. Sin embargo, este progreso no ha estado exento de polémica. La aceptación pública de la expansión de la energía eólica ha estado vinculada, en parte, a la transparencia en los procesos administrativos para la instalación de parques eólicos, así como a la distribución equitativa de los beneficios entre la ciudadanía y la evaluación adecuada del valor de los terrenos forestales donde se sitúan dichas instalaciones (Ferreira et al., s/f). Por ello, en este apartado se realizará un análisis sobre la evolución de la Energía Eólica en la Unión Europea a lo largo de los últimos años, el estado actual y las perspectivas de futuro que se plantean.

2.4.1. Energía Renovable Marina en la Unión Europea

La energía renovable marina ha emergido como una de las soluciones más prometedoras para abordar los desafíos energéticos y climáticos que enfrenta el mundo en el siglo XXI. Desde los primeros parques eólicos marinos hasta los desarrollos más recientes en energía undimotriz y mareomotriz, la capacidad de aprovechar los recursos naturales del océano para generar electricidad se ha establecido como un gran punto de interés para gobiernos y empresas en todo el mundo.

Entre los grandes líderes globales en la transición y evolución hacia el aprovechamiento de las energía renovables, con el objetivo de establecer un futuro más sostenible y descarbonizado, se encuentra la Unión Europea. En 1991, Dinamarca inauguró el primer parque eólico marino del mundo en Vindeby, marcando un hito histórico en el desarrollo de la energía eólica marina a gran escala. Desde entonces, la tecnología ha avanzado significativamente, con parques eólicos marinos que ahora son una característica común en las costas de varios países europeos. Hoy en día, esta tecnología ha evolucionado y abastece a millones de personas en todo el mundo. Las nuevas instalaciones son altamente eficientes, no solo tienen factores de capacidad elevados, sino que además sus costes han disminuido constantemente en la última década. Esto ha llevado a una mayor viabilidad económica de la energía eólica marina, convirtiéndola en una opción atractiva para la generación de electricidad a gran escala.

Partiendo de una capacidad instalada actual de alrededor de 12 Gigavatios (GW) de energía eólica marina, la Comisión Europea ha establecido objetivos ambiciosos para el futuro. Se estima que para 2030, la capacidad instalada de energía eólica marina debería alcanzar al menos 60 GW, con una perspectiva aún más ambiciosa de llegar a 300 GW para 2050. Estos objetivos son vistos como realistas y alcanzables, y se espera que generen importantes beneficios en términos de reducción de emisiones de carbono en la generación de electricidad en la UE.

La UE se encuentra en una posición de liderazgo en el ámbito del desarrollo de tecnologías de energía oceánica, tanto en energía undimotriz como mareomotriz, gracias a su extenso espacio marítimo y la variedad de cuencas marinas que posee (Ilustración 6). Esto ofrece grandes oportunidades para el desarrollo de energías renovables marinas que pueden complementar y fortalecer la seguridad energética de la región.

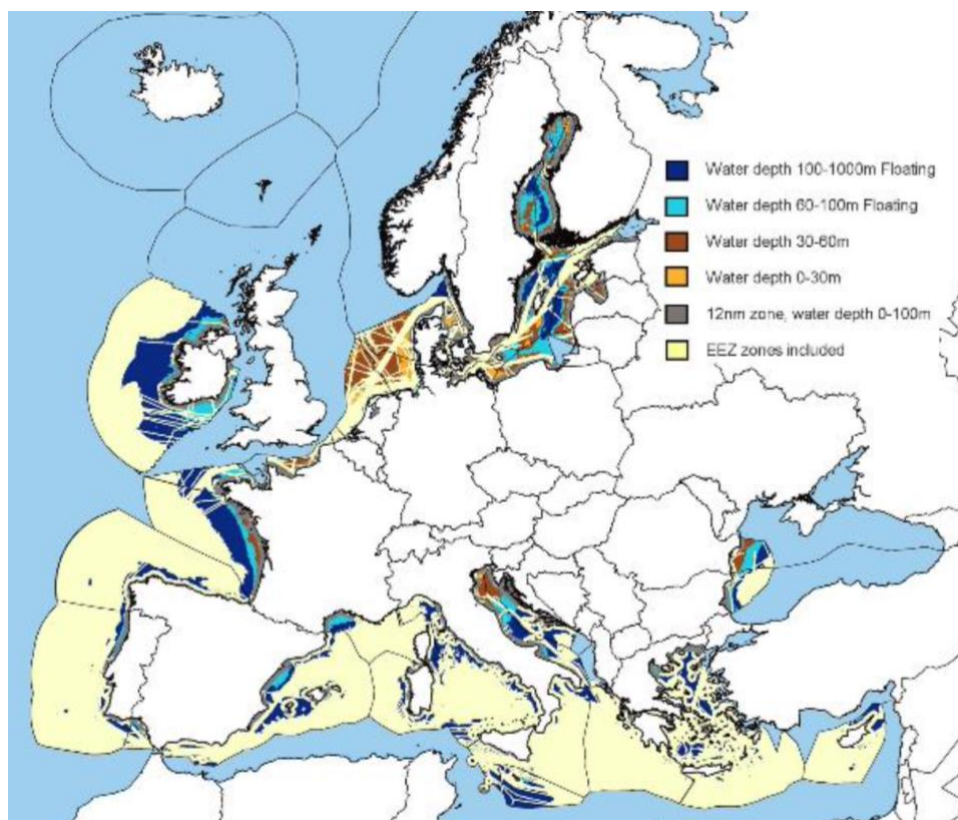


Ilustración 6. Potencial técnico de la energía eólica marina en cuencas marinas accesibles a los países de la UE27. Fuente: European Commission (2020).

Sin embargo, uno de los principales obstáculos es la integración efectiva de estos objetivos en los planes nacionales de energía y clima de los Estados miembros. Esto requiere una coordinación entre los gobiernos nacionales y la UE, así como una planificación espacial marítima adecuada que tenga en cuenta las necesidades tanto de la energía renovable como de otras actividades económicas y sociales en el mar.

Otro desafío clave es la financiación de la expansión de la energía renovable marina. Se estima que las necesidades de inversión para el despliegue a gran escala de estas tecnologías hasta 2050 ascenderán a casi 800 000 millones de euros. Esto requerirá una combinación de inversiones públicas y privadas, así como una mayor colaboración entre los sectores público y privado. Además, se necesita un marco regulatorio claro y estable para atraer inversiones y garantizar un crecimiento sostenible del sector.

La investigación y la innovación desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de la energía renovable marina. En los últimos años, la UE ha invertido considerablemente en programas de I+D en este campo, con un enfoque en tecnologías como la energía eólica marina flotante, nuevos materiales y componentes, y mantenimiento y seguimiento. Sin embargo, se necesita un mayor impulso en este frente para superar los desafíos técnicos y ambientales que aún persisten.

La expansión de la capacidad de energía renovable marina también requerirá un aumento en la capacidad de la cadena de suministro. Se necesitarán inversiones significativas en materiales resistentes a la corrosión, fabricación de turbinas y dispositivos, infraestructura portuaria y buques para satisfacer la demanda creciente. Además, se necesitará una mayor cooperación y coordinación entre los países de la UE para maximizar la eficiencia y reducir los costes.

La energía renovable marina representa una oportunidad única para la UE para impulsar su transición hacia un futuro más sostenible y descarbonizado. Con el liderazgo adecuado, la inversión y la innovación, la UE puede aprovechar el gran potencial de sus océanos y cuencas marinas para satisfacer sus necesidades energéticas de manera sostenible y ambientalmente responsable (European Commission, 2020).

2.4.2. Evolución de los precios de las fuentes de energía

En las últimas décadas, los precios de la electricidad en Europa han experimentado un aumento significativo de forma estrechamente relacionada con el alto costo del gas. Este aumento en el precio del gas ha llevado a un encarecimiento en la producción de electricidad en las centrales alimentadas por este combustible fósil. La crisis energética actual resalta la importancia crucial de materializar las ambiciones del Pacto Verde Europeo, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y, en particular, de las importaciones de gas. El Pacto Verde Europeo es un plan realizado por la Unión Europea para lograr la neutralidad climática en 2050, transformando la economía europea en un modelo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Este plan integral abarca una amplia serie de políticas y medidas destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, promover la eficiencia energética, impulsar la transición hacia energías renovables, proteger la biodiversidad, fomentar la economía circular y garantizar una transición justa para todos los sectores y regiones.

En el año 2021, los precios del gas y la electricidad alcanzaron niveles récord, y alcanzaron máximos históricos tras la invasión rusa de Ucrania en las primeras semanas de marzo de 2022. Esta situación ha generado una preocupación significativa en toda Europa, dado que los mercados energéticos en la región están altamente integrados. Los Estados miembros dependen de estos mercados interconectados para garantizar la seguridad del suministro y reducir los costes generales del sistema. De acuerdo con estimaciones de la Agencia de Cooperación de los Reguladores de la Energía (ACER), la ganancia promedio anual del mercado integrado de electricidad para los consumidores europeos es de alrededor de 34 mil millones de euros.

Los altos precios del gas (Ilustración 7), impulsados por el aumento de la demanda después de la pandemia de COVID-19 y la incertidumbre generada por la crisis geopolítica en Europa del Este, son la causa principal de la crisis energética actual. Dado el papel crucial que desempeña el gas en la generación de energía, encontrar formas de abordar estos altos precios también ayudará a mitigar las consecuencias en los mercados de electricidad, así como sus impactos sociales y laborales.

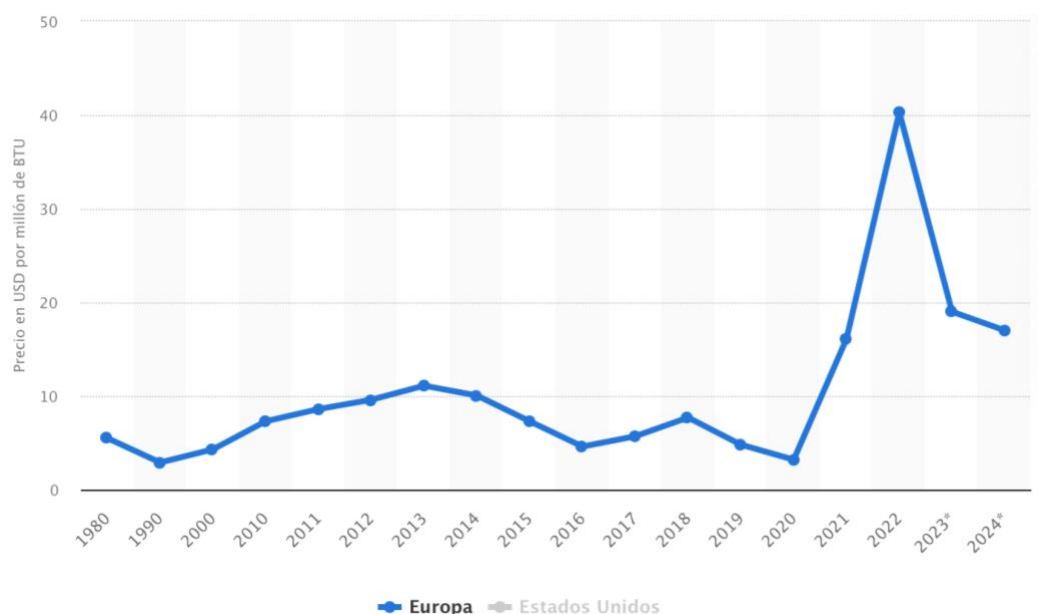


Ilustración 7. Evolución del precio del gas en la última década en Europa. Fuente: Statista (2024).

Para hacer frente a esta situación, la Comisión Europea y los Estados miembros han establecido recientemente la Plataforma Energética de la UE, que tiene como objetivo garantizar el suministro de energía a precios justos y reducir gradualmente la dependencia de la UE del gas ruso.

En un informe reciente, ACER concluye que el diseño del mercado eléctrico europeo brinda beneficios significativos a los consumidores europeos, pero identifica varios desafíos por delante. Estos desafíos incluyen la necesidad de acelerar las inversiones en generación renovable, mejorar la flexibilidad del sistema eléctrico y hacer frente a la creciente volatilidad de los precios.

Además, se destaca la importancia de abordar la pobreza energética, ya que los precios sin precedentes de la energía pueden aumentar el número de ciudadanos que luchan por acceder a este servicio esencial. Esto deja ver la necesidad de implementar políticas sociales efectivas que protejan a los consumidores más vulnerables.

Para garantizar la seguridad del suministro a largo plazo y proporcionar certidumbre a los inversores, será necesario evaluar más a fondo el papel de los mecanismos de capacidad en el sistema eléctrico europeo. Estos mecanismos deben diseñarse para fomentar inversiones en capacidad de generación firme y baja en carbono, en línea con los objetivos climáticos de la UE.

La Comisión Europea invita también a los Estados miembros a acelerar las medidas de preparación ante una posible interrupción del suministro de gas ruso, en línea con el Plan REPowerEU, una iniciativa de la UE para reforzar la seguridad energética y acelerar la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenible mediante la reducción de la dependencia de combustibles fósiles. Esto resalta la importancia de la cooperación y la acción coordinada en toda Europa para abordar los desafíos energéticos y climáticos que enfrenta la región (European Commission, 2022).

2.4.3. Dependencia de la Unión Europea del suministro de combustibles fósiles

La reciente agresión militar de Rusia contra Ucrania ha generado una serie de consecuencias en el ámbito energético a nivel global y con ello una importante perturbación en el sistema energético mundial. Esta situación ha puesto de manifiesto la urgencia de reducir la dependencia de la Unión Europea de los combustibles fósiles rusos y avanzar hacia una transición energética más limpia y sostenible. En respuesta a este desafío, la UE ha puesto en marcha el plan REPowerEU, que tiene como objetivo principal acelerar esta transición y fortalecer la resiliencia del sistema energético europeo, además de impulsar una verdadera Unión Energética que garantice la seguridad energética para todos los países miembros.

Una de las claves para el éxito del plan REPowerEU radica en la intensificación y actualización de los Planes Nacionales de Energía y Clima (PNEC) de los Estados miembros. Estos planes desempeñan un papel crucial en la definición de políticas y medidas destinadas a reducir el uso de combustibles fósiles y promover la adopción de fuentes de energía más limpias y renovables. Al mejorar la confianza de los inversores y proporcionar previsibilidad en las inversiones, los PNEC se convierten en un instrumento fundamental para la consecución de los objetivos de REPowerEU.

En paralelo, se están llevando a cabo esfuerzos para interconectar las redes eléctricas de la UE (Ilustración 8) con las de países vecinos como Ucrania y Moldavia. La reciente sincronización de emergencia de las redes eléctricas de estos países con la red europea demuestra el compromiso de la UE de fortalecer la interconexión y garantizar el suministro energético en momentos de crisis. Esta interconexión permitirá a los Estados miembros de la región compensar la reducción de las importaciones de gas mediante la compra de electricidad excedente de Ucrania, contribuyendo así a la diversificación de fuentes de energía y a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles.

El plan REPowerEU representa un enfoque integral y ambicioso para acelerar la transición hacia un sistema energético más limpio, seguro y sostenible en Europa. A través de medidas como la intensificación de los PNEC, la promoción de las energías renovables y la mejora de la eficiencia energética, la UE busca reducir su dependencia de los combustibles fósiles rusos y avanzar hacia una economía baja en carbono y resiliente ante futuras crisis energéticas (European Commission, 2022).

2.4.4. Objetivos y progresos respecto al uso de Energías Renovables

Los hitos que se marcaron para el año 2020 representan un punto de partida crucial hacia la meta de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 55% para el año 2030, como se establece en el Plan de Objetivos Climáticos del Pacto Verde Europeo. Este paso hacia la neutralidad climática para el año 2050 implica una profunda descarbonización en todos los sectores económicos, lo que significa pasar de nuestro actual sistema energético a uno integrado, principalmente basado en fuentes renovables. Para lograr una reducción del 55% en las emisiones de gases de efecto invernadero, la proporción de energías renovables debe situarse entre el 38% y el 40% para el año 2030.

La estrategia de integración del sistema energético resalta la importancia de que el futuro energético de Europa dependa cada vez más de fuentes renovables distribuidas geográficamente, que integren diferentes vectores de energía de manera flexible. Este enfoque busca mantener un uso eficiente de los recursos y evitar la contaminación y la pérdida de biodiversidad. Además, la transición hacia una energía limpia y renovable se considera un pilar fundamental para la recuperación económica tras la crisis generada por el COVID-19.

La reciente Directiva proporciona un marco sólido para cumplir el objetivo vinculante de la UE de alcanzar al menos un 32% de energía renovable en el consumo final bruto de energía para 2030. Se espera que, con la implementación de los Planes Nacionales de Energía y Clima (PNEC), la participación de energía renovable en la UE alcance entre el 33,1% y el 33,7% para 2030.

La UE se destaca internacionalmente en el ámbito de las patentes de alto valor, lo que demuestra su liderazgo en innovación y exportación de tecnologías bajas en carbono mejoradas y nuevas.

El sector de las energías renovables no solo contribuye al crecimiento económico de Europa, sino que también genera empleo local. Con más de 1,5 millones de personas empleadas en el sector y una facturación anual estimada de 158 900 millones de euros, las energías renovables son un motor importante para la economía europea.

La disminución de los precios mayoristas de la energía en los últimos años se atribuye en gran medida al aumento en la cantidad de energía renovable en la UE. Esta reducción de costes puede potencialmente beneficiar a la industria al reducir los costes energéticos y mejorar su competitividad. Además, la caída de los costes tecnológicos, combinada con la digitalización, está empoderando a los consumidores y permitiendo que desempeñen un papel activo en la transición energética.

El informe sobre precios y costes de la energía en Europa destaca que las energías renovables, como la solar y la eólica, fueron responsables de la mayor parte de la nueva generación de energía en 2019 a nivel mundial, un hito histórico.

La disminución de los costes también ha impulsado el aumento en los acuerdos corporativos de compra de energía renovable, lo que indica un cambio hacia un suministro de energía más sostenible y descentralizado en Europa.

Aunque la UE está en camino de cumplir sus objetivos de energía renovable establecidos, es crucial continuar con el despliegue de energías renovables para mantenerse en la senda establecida por el Paquete de Energía Limpia y avanzar hacia los objetivos de 2030 y 2050. La inversión y la innovación continuas en tecnologías renovables son fundamentales para asegurar una transición energética exitosa y cumplir con los compromisos climáticos de la UE a largo plazo (European Commission, 2020).

Capítulo 3 Técnicas de Inspección No Destructivas

En este capítulo, se profundiza en el conocimiento de las Técnicas de Inspección No Destructivas (TIND) y su aplicación en el contexto específico del sector eólico. Comenzando con una exploración del concepto fundamental de las TIND, se examinarán los diferentes tipos de técnicas disponibles y su relevancia en la inspección de componentes críticos en la industria eólica. Se destacará la importancia vital de estas técnicas en la garantía de la integridad estructural y el funcionamiento seguro de los aerogeneradores. Además, se analizará detalladamente el estado actual de la implementación de las TIND en el sector eólico. Este capítulo proporcionará una base sólida para comprender la relevancia y el potencial impacto de las Técnicas de Inspección No Destructivas en la industria eólica.

3.1 Técnicas de Inspección No Destructivas - Concepto

Las Técnicas de Inspección No Destructivas son procedimientos de evaluación que permiten examinar materiales, componentes o estructuras sin alterar su integridad ni causar daño permanente. Estas técnicas se aplican en una amplia gama de sectores industriales como la aeroespacial, automotriz, manufacturera, construcción y energética, entre otras, donde juegan un papel fundamental en la detección y prevención de posibles fallos que puedan comprometer la seguridad y la eficiencia de los procesos implicados.

Los métodos de prueba no destructivos son esenciales para garantizar la calidad, la seguridad y la confiabilidad en diversas industrias. El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) impulsa la adopción de estas tecnologías para mantener altos estándares de control de calidad en la operación segura de instalaciones nucleares y otras infraestructuras industriales. Además, colabora con los Estados Miembros ofreciendo capacitación en el uso de estas tecnologías y suministrando el equipo requerido (International Atomic Energy Agency, 2024).

3.2 Tipos de Técnicas de Inspección No Destructivas

Estos métodos se pueden realizar en metales, plásticos, cerámicas, compuestos, cermets y revestimientos para identificar grietas, huecos internos, cavidades superficiales, delaminación, soldaduras defectuosas incompletas y cualquier tipo de defecto que conduzca a un fallo prematuro. Existen varias TIND utilizadas en el sector de la energía eólica, cada una con sus propias aplicaciones y ventajas. Algunas de las técnicas más comunes incluyen (Dwivedi, et al., 2018):

- Inspección visual: Esta técnica implica la observación directa de los componentes del aerogenerador para detectar cualquier signo de daño, corrosión o desgaste. Aunque es una de las técnicas más simples, sigue siendo fundamental para identificar problemas visibles a simple vista, ya que la inspección visual es particularmente eficaz para detectar defectos macroscópicos, como soldaduras deficientes por grietas en cráteres, socavaciones, inclusión de escoria, soldaduras de penetración incompletas y similares (Ilustración 9).



Ilustración 9. Técnica de inspección visual. Fuente: SCI (2024).

- Ultrasonido: El ultrasonido se utiliza para detectar defectos y discontinuidades internas en materiales metálicos conductores de sonido, como grietas, inclusiones o porosidades. El principio del funcionamiento de las pruebas ultrasónicas consiste en generar un breve pulso de ultrasonido mediante una carga eléctrica aplicada a un cristal piezoeléctrico, que vibra durante un período muy corto a una frecuencia relacionada con el espesor del cristal. En la detección de defectos, esta frecuencia suele estar en el rango de 1 MHz a 6 MHz. Las pruebas ultrasónicas emplean un conjunto extremadamente diverso de métodos basados en la

generación y detección de vibraciones u ondas mecánicas dentro de los objetos de prueba. El tubo de rayos catódicos es el método estándar para presentar información en pruebas ultrasónicas (Ilustración 10).



Ilustración 10. Técnica de inspección con ultrasonido. Fuente: SCI (2024).

- **Radiografía:** La radiografía utiliza rayos X o rayos gamma para penetrar en los materiales y crear una imagen que revele posibles defectos internos, como grietas, inclusiones o discontinuidades. Esta técnica es especialmente útil para inspeccionar soldaduras y estructuras complejas respecto al resto ya que proporciona una referencia permanente de la solidez interna del objeto que se radiografía. Si se radiografía cualquier defecto o irregularidad, como un vacío presente en el objeto, pasarán más rayos X en esa área y la película debajo de la pieza, a su vez, tendrá más exposición o luz puntual que en las áreas no vacías. La sensibilidad de los rayos X es nominalmente del 2% del espesor del material y las piezas suelen radiografiarse desde diferentes planos. Sin embargo, este método es menos popular porque presenta la desventaja de los peligros durante la manipulación de materiales radiactivos.

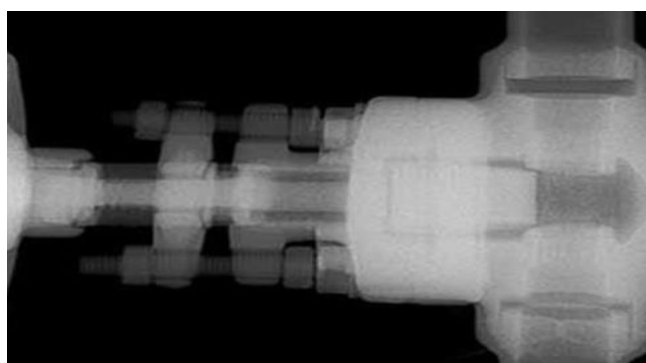


Ilustración 11. Técnica de inspección con radiografía. Fuente: SCI (2024).

- Partículas magnéticas: En esta técnica, se aplica un campo magnético a la superficie del material y se esparcen pequeñas partículas magnéticas finas, como limaduras de hierro, para detectar defectos en los componentes. Si hay alguna discontinuidad en el material, las partículas se acumularán en esa área, revelando la presencia de defectos, estando el componente que se inspecciona fabricado con un material ferromagnético como hierro, níquel o cobalto. Estos materiales deben poder magnetizarse a un nivel que permita que la inspección sea efectiva (Ilustración 11).



Ilustración 12. Técnica de inspección con partículas magnéticas. Fuente: SCI (2024).

- Líquidos penetrantes: Esta técnica implica la aplicación de un líquido penetrante en la superficie del material. El líquido penetra en grietas o porosidades y luego se elimina. Se aplica un revelador que hace que el líquido penetre visible, revelando cualquier defecto presente. Los materiales más comunes que se inspeccionan incluyen metales, vidrio, cerámicos, caucho y plásticos. Esta técnica se basa en la acción capilar, donde el fluido de baja tensión superficial penetra en discontinuidades limpias y secas que rompen la superficie. El penetrante se puede aplicar al componente o muestra de prueba mediante inmersión, pulverización o brocha. Después de permitir un tiempo de penetración adecuado, se elimina el exceso de penetrante y se aplica un revelador (Ilustración 13).

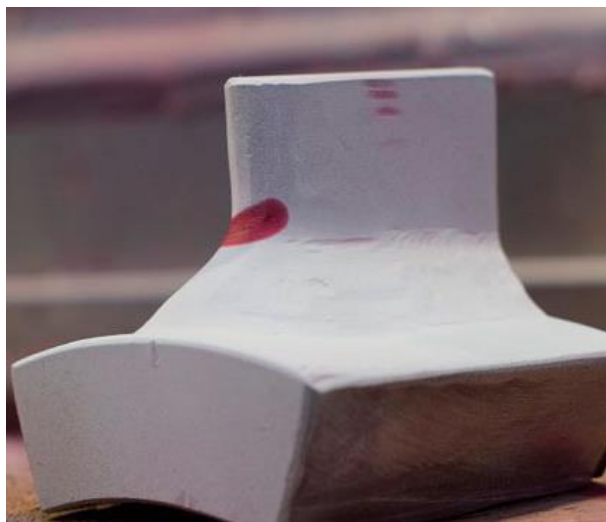


Ilustración 13. Técnica de inspección con líquidos permanentes. Fuente: SCI (2024).

Desde la detección de problemas visibles hasta la evaluación de la integridad estructural interna, estas técnicas aseguran la calidad y fiabilidad de los componentes. Al combinar métodos que abarcan desde la superficie hasta lo más profundo, se garantiza la seguridad operativa y se prolonga la vida útil de los aerogeneradores, optimizando así su rendimiento y contribuyendo a la sostenibilidad del sector eólico.

3.3 Importancia de las Técnicas de Inspección No Destructivas en el Sector Eólico

Las técnicas de inspección no destructivas desempeñan un papel crucial en el sector de la energía eólica debido a su capacidad para evaluar la integridad estructural y el rendimiento de los componentes críticos de los aerogeneradores sin comprometer su funcionalidad ni su vida útil. En un entorno donde la seguridad, la eficiencia y la fiabilidad son de vital importancia, estas técnicas permiten identificar posibles defectos, daños o irregularidades en las palas, torres, generadores, sistemas de transmisión y otros elementos clave de los aerogeneradores. Gracias a la implementación de estas técnicas se fomenta:

- Mantenimiento preventivo: Permiten detectar y corregir posibles fallos antes de que se conviertan en problemas graves, lo que ayuda a evitar costosas reparaciones y tiempos de inactividad no planificados.

- **Seguridad:** Ayudan a garantizar la seguridad de los trabajadores y la protección del medio ambiente al identificar posibles defectos o debilidades en los aerogeneradores y sus componentes.
- **Eficiencia operativa:** Al detectar y corregir problemas de manera oportuna, contribuyen a mantener la eficiencia operativa de los parques eólicos, asegurando un rendimiento óptimo de los aerogeneradores.
- **Cumplimiento normativo:** Las técnicas de inspección no destructivas son fundamentales para cumplir con los requisitos reglamentarios y las normativas de seguridad en el sector de la energía eólica. Además, en términos de sostenibilidad, estas técnicas pueden desempeñar un papel importante en la gestión ambiental al reducir la necesidad de reemplazo prematuro de equipos y minimizar los residuos asociados con las reparaciones y los reemplazos innecesarios.

Las Técnicas de Inspección No Destructivas son herramientas fundamentales en el sector de la energía eólica, ya que permiten mantener la integridad, seguridad y eficiencia de los aerogeneradores y sus componentes. Su aplicación adecuada y regular es esencial para garantizar el funcionamiento óptimo de los parques eólicos y contribuir al éxito continuo de la industria eólica.

3.4 Evolución de la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas en el Sector de la Energía Eólica

En la actualidad, establecer una producción sostenible se ha vuelto uno de los principales objetivos a alcanzar por las empresas. La producción sostenible exige que las empresas manufactureras mejoren continuamente la calidad y complejidad de sus productos, reduciendo al mismo tiempo los costes. En este sentido, enfocarse en la calidad desde el principio es esencial para destacar en el mercado, ya que una mejor calidad conlleva a menores costes, gracias a la reducción de retrabajos, errores y demoras (Powell et al., 2022).

La calidad del producto es un aspecto crítico para los fabricantes, ya que influye directamente en la satisfacción del cliente, la reputación de la empresa y su competitividad en el mercado. La entrega de productos de alta calidad es esencial para mantener la confianza del consumidor y garantizar la lealtad a la marca.

Por el contrario, la mala calidad del producto puede tener efectos perjudiciales en varios niveles. Además de causar pérdidas financieras directas debido a devoluciones, rechazos y reclamaciones de garantía, puede aumentar el impacto ambiental a través del desperdicio de recursos y la generación de residuos. Asimismo, puede tener impactos sociales negativos al afectar la reputación de la empresa a través de la insatisfacción del cliente y la percepción pública de productos de calidad inferior.

3.4.1. Procesos de producción e implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas

Para abordar estos desafíos y lograr una verdadera sostenibilidad, las empresas deben equilibrar los factores económicos, sociales y ambientales en sus operaciones. Esto implica no solo producir bienes y servicios de alta calidad, sino también hacerlo de manera eficiente y respetuosa con el medio ambiente, al tiempo que se promueven condiciones laborales justas y se contribuye positivamente a la comunidad.

En la industria manufacturera moderna, la personalización del producto es un requisito cada vez más importante para satisfacer las demandas cambiantes del mercado. Sin embargo, este enfoque puede ralentizar la producción debido a la complejidad adicional y la necesidad de adaptarse a las preferencias individuales de los clientes. Además, los procedimientos de inspección in situ, que son necesarios para garantizar la calidad del producto, pueden contribuir a esta ralentización, especialmente cuando se enfrentan a la presión constante para acortar los ciclos de fabricación y garantizar una entrega rápida por parte de los clientes (Azamfirei et al., 2023).

A pesar de optimizar un proceso individual, aún existe la posibilidad de que se generen defectos que se propaguen en etapas posteriores del proceso. La mayoría de las investigaciones previas y contemporáneas sobre fabricación con Cero Defectos (ZDM, por sus siglas en inglés) han tendido a enfocarse en procesos que se realizan en una sola etapa.

La disponibilidad de datos, que comenzó con la aparición de la Industria 4.0 hace una década, ha permitido la implementación automatizada de soluciones de monitoreo avanzadas y el desarrollo de metodologías basadas en modelos para mejorar la calidad. Sin embargo, la validación de estas soluciones en contextos reales y los desafíos de integración de múltiples fuentes de datos y marcos ZDM con especificaciones de alto nivel limitan su aplicabilidad (Powell et al., 2022).

Esto pone de relieve cómo las prácticas de fabricación existentes centradas en la calidad no siempre cumplen con la visión de la Industria 4.0, que busca una mayor automatización, integración e interoperabilidad de los sistemas de producción. Para alcanzar este objetivo, es fundamental eliminar los silos de datos y lograr una integración total del sistema, lo que permitirá una comunicación fluida y una colaboración eficiente entre todos los componentes del proceso de fabricación (Azamfirei et al., 2023).

En las estrategias de calidad tradicionales, los circuitos de retroalimentación se implementan en niveles de proceso único (Ilustración 14), lo que genera problemas como retrasos en la identificación de defectos y falta de análisis simultáneo de datos del producto y del proceso. En contraste, las estrategias de ZDM buscan identificar proactivamente defectos y evitar el retrabajo compensando los defectos y desviaciones aguas abajo en la cadena del proceso mediante bucles de control anticipativo (Ilustración 15).

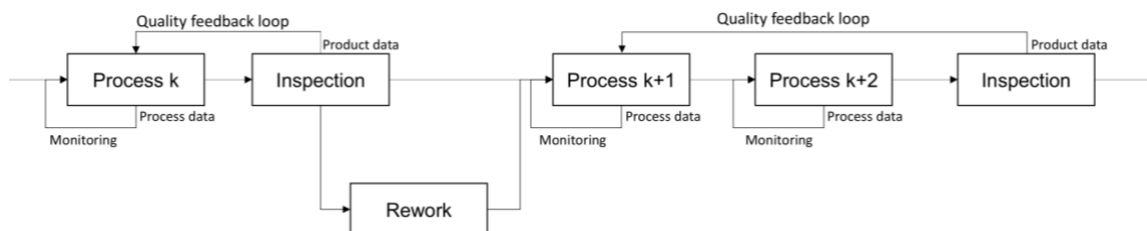


Ilustración 14. Diagrama de las estrategias tradicionales de calidad. Fuente: Powell et al. (2022).

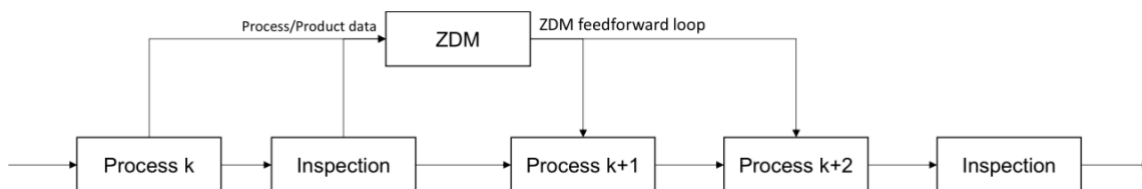


Ilustración 15. Diagrama de las estrategias ZDM. Fuente: Powell et al. (2022).

El campo de la inspección de calidad ha experimentado una evolución significativa en los últimos años, impulsado por avances en tecnología, como la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y la visión por computadora. Esta evolución ha dado lugar a siete grandes grupos de investigación, que incluyen la fabricación sin defectos, la industria 4.0, la inspección visual, la fabricación aditiva, el seguimiento, el control de calidad y la inspección de calidad.

La aplicación de la automatización para la inspección de calidad en línea se ha investigado principalmente en industrias como la de semiconductores, fabricación genérica, siderurgia, automoción, aeroespacial y fabricación aditiva. Sin embargo, un punto crítico en el proceso de inspección de calidad es el equipo utilizado para dicha tarea. El tipo de equipo predeterminará la precisión, repetibilidad y velocidad de la tarea de inspección de calidad, lo que afectará directamente la eficiencia y la efectividad del proceso.

Entre los diferentes enfoques de inspección de calidad, los sistemas de visión artificial son los más investigados, ya que ofrecen capacidades avanzadas de detección y análisis de imágenes. La detección es fundamental para el control de calidad, y existen diferentes enfoques, como la detección virtual, que se alinea con el concepto de Manufactura con Cero Defectos (ZDM). La detección virtual tiene como objetivo predecir y prevenir defectos en lugar de simplemente detectarlos y corregirlos, lo que representa un enfoque más proactivo y preventivo para garantizar la calidad del producto.

Para que la inspección de calidad automática sea efectiva, se requiere un uso intensivo de datos y la implementación de sensores para recopilar información de diversas fuentes. Estos datos son fundamentales para la toma de decisiones informadas y la mejora continua de los procesos de fabricación. Sin embargo, existe una falta de estandarización en las soluciones desarrolladas, lo que dificulta la interoperabilidad y la comparación entre diferentes sistemas. Para abordar este desafío, es necesario un enfoque colaborativo entre las comunidades industriales y de investigación, con el objetivo de desarrollar estándares comunes y mejores prácticas en el campo de la inspección de calidad automática (Azamfirei et al., 2023).

3.4.2. Ejemplo de caso de inspección de un proceso de pintura de Torres Eólicas bajo la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas

El despliegue de sistemas de inspección automatizados supone una innovación en las políticas de aseguramiento de la calidad en la fabricación de torres de acero para equipos de energía eólica, cuyo objetivo es la implementación de nuevos enfoques como las metodologías de cero defectos y cero residuos. Actualmente, el proceso de inspección de pintura se realiza manualmente por operadores dentro de la cabina de pintura, por lo que termina siendo una tarea repetitiva basada en la subjetividad de cada operario y el cansancio visual por la inspección de objetos de gran tamaño durante periodos importantes.

La integración de sistemas de visión artificial en entornos industriales con partículas nocivas en suspensión, como ocurre en el proceso de pintura (Ilustración 16), aumenta la seguridad en las operaciones de inspección al mitigar los riesgos asociados al trabajo manual al tiempo que promueve la formación y creación de nuevos puestos de trabajo relacionados con IA. Además, el sistema de adquisición de datos, que consiste en sensores o dispositivos de inspección no destructiva, recopila y sincroniza los datos durante el proceso de producción. Estos datos se transmiten luego a una plataforma de gestión de datos (Ilustración 17).

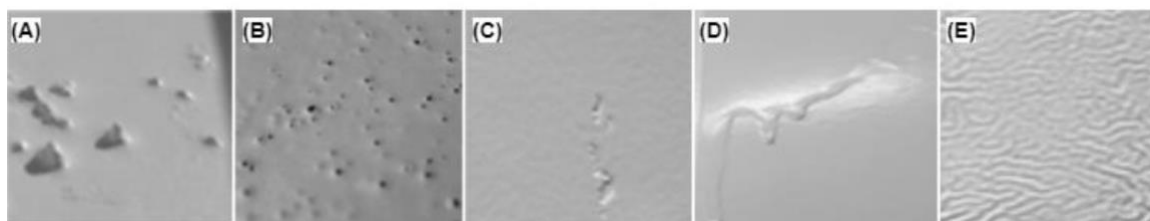


Ilustración 16. Defectos de pintura en una torre eólica (A) inclusión, (B) poro, (C) rayones, (D) delaminación y (E) arrugado. Fuente: Lario et al. (2023).

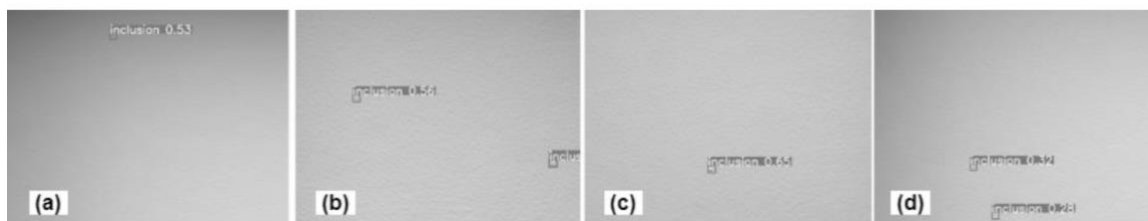


Ilustración 17. Detección de inclusión de datos invisibles. Fuente: Lario et al. (2023).

La implementación de sistemas de inspección automatizados reduce la fatiga humana asociada con el trabajo manual, lo que garantiza una atención constante a los detalles durante todo el proceso de pintura. Los sistemas de visión basados en visión artificial mejoran la fiabilidad y precisión en la detección de anomalías, que se exigen para cumplir con los estándares de calidad de los Fabricantes de Equipos Originales (OEM) del sector eólico (Lario et al., 2023).

En el caso anterior, los resultados del algoritmo de IA actual se basan en la red neuronal y se entrenan con un conjunto de datos de cientos de imágenes, y el defecto de detección de inclusión en el proceso de pintura se detecta fácilmente. El algoritmo entrenado actual permite la identificación de anomalías de inclusión, pero no puede identificar correctamente las clases de anomalías restantes debido al bajo conjunto de datos empleado.

El desarrollo de soluciones basadas en tecnologías de inspección no destructivas promoverá la calidad en el proceso, reduciendo el consumo de material y energía, y mejorando la eficiencia y la rentabilidad. El despliegue de sistemas ciber físicos para el aseguramiento de la calidad considerará aspectos fundamentales como la seguridad, confiabilidad y disponibilidad. La evaluación continua de los requisitos será crucial para garantizar un despliegue eficiente de las soluciones en el entorno industrial (Lario et al., 2023).

Capítulo 4 Impacto logístico sobre la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas en el Sector Eólico - Revisión literaria

La industria eólica se ha consolidado como una de las principales fuentes de energía renovable en todo el mundo, con un crecimiento constante impulsado por la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y avanzar hacia un futuro más sostenible. En este contexto, la calidad y fiabilidad de los componentes utilizados en la construcción y operación de parques eólicos son cruciales para garantizar la eficiencia operativa y la seguridad a largo plazo de las instalaciones.

La implementación de técnicas de inspección no destructivas es una herramienta fundamental para evaluar la integridad estructural y la calidad de los materiales utilizados en la fabricación de componentes eólicos, como las palas de los aerogeneradores y las torres. Por ello, este capítulo aborda el impacto logístico que tiene la adopción de estas técnicas en el sector eólico, centrándose en aspectos como la eficiencia de la cadena de suministro, los tiempos de ejecución y la reducción de costes. A través de una revisión exhaustiva de la literatura, este capítulo examina cómo la adopción de estas técnicas afecta en el ámbito logístico en el sector de la energía eólica.

4.1 Revisión de la literatura

La revisión bibliográfica desempeña un papel fundamental en cualquier investigación académica y científica al proporcionar un sólido contexto teórico y conceptual sobre el cual se fundamenta el estudio. Al examinar detenidamente la literatura existente, se exploran las contribuciones previas para comprender cómo ha evolucionado el conocimiento en el área de estudio y se establece la relevancia de la investigación actual.

El objetivo principal de esta revisión bibliográfica es analizar, resumir y evaluar críticamente los estudios, teorías y enfoques relacionados con la implementación de técnicas de inspección no destructiva. Para lograr este propósito, se ha llevado a cabo una exhaustiva búsqueda de publicaciones consideradas altamente relevantes. Previamente a esta investigación, se establecieron criterios específicos que sirvieron como guía para definir el alcance de la búsqueda.

4.1.1. Metodología

Para llevar a cabo esta revisión bibliográfica y situar el área de estudio en su contexto actual, es esencial establecer una metodología sólida para la búsqueda y selección de investigaciones relevantes en este contexto. A continuación, se detallan los pasos clave establecidos para llevar a cabo esta búsqueda de información:

- Criterios de inclusión y exclusión: Para recopilar información de manera efectiva, se establecieron filtros y criterios de selección para refinar la búsqueda y eliminar cualquier información irrelevante para el estudio. Esto garantiza la obtención de resultados coherentes y manejables. Los criterios incluyeron la selección de literatura publicada en los últimos años para observar la evolución de las publicaciones a lo largo del tiempo. Además, se consideró el idioma como un criterio importante, limitando la búsqueda a documentos redactados en inglés y español.
- Búsqueda y selección de la literatura: Se identificaron una serie de términos clave o *keywords* relacionados con el tema de estudio para buscar información relevante en diferentes bases de datos.
- Selección de fuentes de información: Se descartaron fuentes no académicas o irrelevantes. Se optó por utilizar dos bases de datos recomendadas por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de la Fundación Española de la Ciencia y la Tecnología: *Scopus* y *Web of Science (WoS)*. En ambas bases de datos se establecieron los mismos criterios de selección mencionados anteriormente.

Después de implementar esta metodología, se obtuvieron una serie de publicaciones que permitieron seleccionar la información más relevante para llevar a cabo el análisis. Estos resultados se muestran en el siguiente apartado: Resultados.

4.1.2. Resultados

En una primera búsqueda, se establecieron los criterios mencionados anteriormente y se utilizaron como palabras clave "*Wind Energy*" y "*Non-Destructive Inspection*". En la Tabla 1 se muestran el número de publicaciones obtenidas en ambas bases de datos. A pesar de que la cantidad de publicaciones no es muy elevada, se observa un aumento en el número de publicaciones a lo largo de los años, lo que indica un interés y una relevancia crecientes en la investigación en este ámbito.

Tabla 1. Resultados obtenidos en las bases de datos tras la primera búsqueda. Fuente: Elaboración propia.

Fecha de Publicación	Bases de Datos	
	SCOPUS	WEB OF SCIENCE
	Nº de Artículos	
	<i>"Wind Energy" AND "Non-Destructive Inspections"</i>	
1985-1999	2	1
2010-2014	15	6
2015-2019	23	20
2020-2024 (actualidad)	19	27
TOTAL	59	54

Es notable observar que el número de publicaciones comienza a aumentar significativamente a partir del año 2010. Estos resultados indican un creciente interés y atención en la aplicación de técnicas de inspección no destructivas en el sector de la energía eólica. La tendencia ascendente en el número de publicaciones sugiere que este tema está ganando importancia en la investigación académica y profesional. Este aumento en el tema de estudio podría reflejar tanto los avances tecnológicos en las técnicas de inspección no destructivas como la creciente importancia de la energía eólica como fuente de energía renovable. No obstante, se observa la necesidad de investigación y desarrollo en este campo para mejorar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad de la industria eólica.

Con el fin de acotar esta búsqueda, se decidió añadir la palabra clave *"Efficiency"* a los criterios de la investigación. Con ello, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Resultados obtenidos en las bases de datos tras la segunda búsqueda. Fuente: Elaboración propia.

Fecha de Publicación	Bases de Datos	
	SCOPUS	WEB OF SCIENCE
	Nº de Artículos	
	"Wind Energy" AND "Non-Destructive Inspections" AND "Efficiency"	
2012-2014	3	2
2015-2017	1	2
2018-2020	4	4
2021-2024 (actualidad)	3	4
TOTAL	11	12

Los resultados obtenidos tras aplicar los diferentes criterios de búsqueda dan como resultado un total de 11 publicaciones en *Scopus* y 12 publicaciones en *Web of Science* a partir de las cuáles se realiza una selección final.

4.1.3. Análisis y síntesis

Después de revisar los resultados presentados en la Tabla 2 del apartado anterior, Resultados, se procedió a seleccionar los documentos finales que se muestran en la Tabla 3. En esta tabla se presentan las publicaciones seleccionadas, donde se detallan el título, autor/es, año de publicación, lugar de publicación y la base de datos donde fueron encontradas.

Tabla 3. Artículos seleccionados. Fuente: Elaboración propia.

Nº	Título	Autores	Año	Revista	SCOPUS	WOS
1	Testing, inspecting and monitoring technologies for wind turbine blades: A survey	Yang, B., Sun, D.	2013	Renewable and Sustainable Energy Reviews	SI	NO
2	Thermographic non-destructive inspections of wind turbine blades using unmanned aerial systems	Galleguillos, C., Zorrilla, A., Jimenez, A., ... Viguria, A., Lasagni, F.	2014	16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014	SI	SI
3	Comparison of nondestructive testing techniques for the inspection of wind turbine blades' spar caps	Martin, R.W., Sabato, A., Schoenberg, A., Giles, R.H., Niezrecki, C.	2018	Wind Energy	SI	NO
4	Hyperspectral imaging applied for the detection of wind turbine blade damage and icing	Rizk, P., Al Saleh, N., Younes, R., Ilinca, A., Khoder, J.	2020	Remote Sensing Applications: Society and Environment	SI	SI
5	A Survey on Non-Destructive Smart Inspection of Wind Turbine Blades Based on Industry 4.0 Strategy	Dimitrova, M., Aminzadeh, A., Meiabadi, M.S., ... Taheri, H., Ibrahim, H.	2022	Applied Mechanics, 3(4), pp. 1299–1326	SI	SI

Nº	Título	Autores	Año	Revista	SCOPUS	WOS
6	Non-destructive and contactless defect detection inside leading edge coatings for wind turbine blades using mid-infrared optical coherence tomography	Petersen, C.R., Fæster, S., Bech, J.I., ... Israelsen, N.M., Bang, O.	2023	Wind Energy, 26(5), pp.458-468	SI	SI
7	Non-Contact Inspection Methods for Wind Turbine Blade Maintenance: Techno–Economic Review of Techniques for Integration with Industry 4.0	Aminzadeh, A., Dimitrova, M., Meiabadi, M.S., ... Ibrahim, H., Wen, Y.	2023	Journal of Nondestructive Evaluation, 42(2), 54	SI	SI

A pesar de que todas estas publicaciones se centran en el análisis de la implantación de técnicas de inspección no destructiva en el ámbito del sector eólico, cada uno de ellos se enfoca en diferentes contextos, objetivos y casos de estudio, entre otros aspectos. Esta diversidad de puntos de vista y enfoques ofrece la oportunidad de examinar el tema desde diversas perspectivas, aprovechando una amplia gama de datos e información. Además de analizar los enfoques empleados, es importante comprender claramente los principales resultados obtenidos por los autores, considerando las perspectivas adoptadas. A continuación se presentan estos hallazgos detalladamente:

Los autores Yang & Sun (2013) en la publicación "*Testing, inspecting and monitoring technologies for wind turbine blades: A survey*" realizan una amplia revisión de las tecnologías utilizadas en la prueba, inspección y monitoreo de las palas de torres eólicas. Analizan diferentes métodos y técnicas empleadas en la industria para garantizar la integridad estructural y el rendimiento óptimo de las palas que son fundamentales para la operación segura y eficiente de los aerogeneradores, desde métodos convencionales de inspección visual hasta la inspección mediante pruebas no destructivas. Se discuten también las ventajas y limitaciones de cada técnica, así como su aplicabilidad en diferentes etapas del ciclo de vida de las palas, desde la fabricación hasta la operación y el mantenimiento.

Los autores destacan la importancia de la detección temprana de defectos y daños, así como la necesidad de implementar sistemas de monitoreo continuo para evaluar el estado de las palas durante su vida útil. Se enfatiza la importancia de la integración de tecnologías como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático con el fin de mejorar la precisión y eficiencia de las operaciones. Además, sugiere líneas de investigación futuras para investigadores y profesionales del sector.

El artículo "*Thermographic non-destructive inspection of wind turbine blades using unmanned aerial systems*" (Galleguillos et al., 2014) estudia el uso de UAS equipados con cámaras termográficas para realizar inspecciones aéreas de las palas de las torres eólicas, destacando la capacidad de estas plataformas para cubrir grandes áreas y acceder a zonas de difícil acceso. Utilizando imágenes térmicas capturadas desde diferentes altitudes y ángulos, se evalúa la eficacia de la termografía para detectar anomalías como delaminaciones, grietas y defectos internos en las palas.

Los resultados muestran que la termografía aérea con UAS ofrece una solución prometedora y eficiente, permitiendo una evaluación rápida y completa de su estado estructural sin la necesidad de detener la operación de los aerogeneradores.

Martin et al. (2018) examinan críticamente varias técnicas de prueba no destructiva para la inspección de los elementos estructurales clave de las palas de torre eólicas en la publicación titulada "*Comparison of nondestructive testing techniques for the inspection of wind turbine blades' spar caps*".

El estudio se centra en evaluar la efectividad de diferentes TIND, incluidas las inspecciones visuales, ultrasonido, termografía activa y pasiva, y técnicas de corriente de Foucault, en la detección de posibles defectos y daños. Los investigadores realizan pruebas comparativas en muestras de palas fabricadas con materiales compuestos, simulando condiciones realistas de operación y envejecimiento.

Los resultados dejan ver las ventajas y limitaciones de cada técnica de inspección, destacando la capacidad del ultrasonido para detectar defectos internos y la termografía para evaluar la distribución térmica superficial. Además, los autores discuten las implicaciones prácticas y económicas de implementar estas técnicas en la industria eólica, incluidos los costes asociados, la accesibilidad y la capacidad para realizar inspecciones periódicas durante la vida útil de las torres eólicas.

Rizk et al. (2020) en la publicación titulada "*Hyperspectral imaging applied for the detection of wind turbine blade damage and icing*" abordan la necesidad de identificar de manera precisa y oportuna cualquier irregularidad en las palas que pueda afectar su rendimiento y seguridad mediante la aplicación de tecnologías de imágenes hiperespectrales.

El artículo profundiza en cómo las imágenes hiperespectrales, que capturan información detallada sobre la composición de los materiales en una amplia gama de longitudes de onda, pueden proporcionar una visión más completa del estado de las palas de las torres. Los autores destacan la capacidad de esta tecnología para detectar incluso pequeñas anomalías que pueden pasar desapercibidas para otros métodos de inspección.

Se remarca la versatilidad de las imágenes hiperespectrales para detectar tanto daños estructurales como formaciones de hielo. Con esta tecnología se pretende poder tomar medidas preventivas y correctivas de manera proactiva, lo que puede ayudar a evitar costosas interrupciones en la operación y minimizar los riesgos asociados con el deterioro de las turbinas.

En (Dimitrova et al., 2022) se analiza la inspección de las palas de turbinas eólicas para garantizar su rendimiento óptimo y prolongar su vida útil. Los autores discuten las problemáticas existentes en la inspección de palas de turbinas eólicas, destacando la importancia de implementar técnicas no destructivas y los avances en tecnología de drones, que ofrecen una solución prometedora para la inspección eficiente y segura de palas en operación.

Además, se analizan los desafíos únicos asociados con la inspección de turbinas eólicas marinas, donde la ubicación remota y las condiciones ambientales extremas presentan dificultades adicionales. Por último, los autores resaltan la necesidad de desarrollar tecnologías de inspección remota y monitoreo de corrosión no destructivas para abordar estas dificultades de manera efectiva.

El artículo "Non-destructive and contactless defect detection inside leading edge coatings for wind turbine blades using mid-infrared optical coherence tomography" (Petersen et al., 2023) se centra en la detección de defectos dentro de los recubrimientos de las palas de aerogeneradores de manera no destructiva y sin contacto.

El estudio presenta el uso de la tomografía de coherencia óptica en el rango medio del infrarrojo (*mid-infrared optical coherence tomography*, MIR-OCT) como una técnica innovadora para la detección de defectos. Esta técnica permite la inspección detallada de los recubrimientos de las palas de los aerogeneradores, proporcionando imágenes tridimensionales de alta resolución que revelan la estructura interna y los posibles defectos.

Los autores describen el desarrollo y la implementación de un sistema MIR-OCT específico para la inspección de recubrimientos de borde de ataque de palas de aerogeneradores y presentan los resultados de estudios experimentales que demuestran la capacidad de esta técnica para detectar defectos como delaminaciones, burbujas de aire y desprendimientos dentro de los recubrimientos. Además, resalta el potencial de la MIR-OCT como una herramienta de inspección avanzada que puede mejorar significativamente la eficiencia y la seguridad de las operaciones de mantenimiento en la industria eólica.

Aminzadeh et al. (2023) en su publicación titulada "*Non-Contact Inspection Methods for Wind Turbine Blade Maintenance: Techno-Economic Review of Techniques for Integration with Industry 4.0*" abordan los métodos de inspección sin contacto para el mantenimiento de las palas de los aerogeneradores haciendo hincapié en el uso de la digitalización y la Industria 4.0 con el fin de que se optimicen la eficiencia y la rentabilidad de la inspección y el mantenimiento de los aerogeneradores.

Los autores realizan una revisión de las técnicas de inspección sin contacto disponibles y evalúa su viabilidad técnica y económica para su implementación en el sector eólico. Se analizan tanto las

capacidades técnicas de estas técnicas como sus implicaciones económicas, incluyendo costes de adquisición, tiempos de inspección y precisión de los resultados.

Además, la publicación explora cómo estas técnicas pueden integrarse con los principios de la Industria 4.0, aprovechando la conectividad de datos, la inteligencia artificial y el análisis avanzado para mejorar la gestión del ciclo de vida de los aerogeneradores y cómo la implementación de estas tecnologías puede conducir a una mayor predictibilidad en el mantenimiento, reduciendo los tiempos de inactividad y los costes operativos asociados.

Tras esta revisión bibliográfica centrada en el impacto que genera la implementación de técnicas de inspección no destructivas en el sector eólico y tras haber seleccionado y analizado 7 artículos relevantes que han sido resumidos destacando los principales hallazgos y contribuciones en este tema, se procede, en el siguiente apartado 4.2, a realizar una revisión exhaustiva para contextualizar y profundizar en el estado actual de dicho campo de estudio.

4.2 Estado actual sobre el impacto logístico por la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas en el Sector Eólico

En este apartado, se llevará a cabo un análisis detallado del estado actual sobre el impacto logístico provocado por la implementación de técnicas de inspección no destructivas en el sector eólico, utilizando como base las publicaciones previamente seleccionadas en el apartado anterior, 4.1.3. Este análisis tiene como objetivo contextualizar las investigaciones actuales, detectar las tendencias emergentes y evaluar las lagunas de conocimiento presentes en el campo.

La mayoría de las turbinas eólicas, tanto grandes como pequeñas, están compuestas por los mismos componentes básicos: palas, ejes, engranajes, generador y cable, que trabajan juntos para convertir la energía eólica en electricidad. Las turbinas eólicas capturan la mayor parte de la energía de sus palas en forma de hélice. Por ello, los autores consideran que las palas son la parte crítica más importante de una turbina eólica. El coste de fabricación de las palas de las turbinas eólicas es aproximadamente entre el 20% y el 30% del coste de producción de las turbinas eólicas (Rizk et al., 2020). Con el paso de los años y con el fin de aumentar la eficiencia de conversión de energía, el tamaño de las palas de las turbinas eólicas se ha hecho cada vez más grande, lo que ha derivado en una serie de problemas de seguridad del servicio (Yang & Sun, 2013).

Con el creciente número de turbinas eólicas instaladas, los fallos importantes de componentes críticos y con el fin de extender el ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores y minimizar los riesgos de operación, no se pueden descuidar las crecientes necesidades de inspecciones en servicio. Es necesario buscar tecnologías efectivas de prueba, inspección y monitoreo de acuerdo con las características de la estructura y los materiales de las palas de los aerogeneradores (Yang & Sun, 2013).

La necesidad de identificar defectos y monitorear la salud estructural se vuelve más crítica para mantener la confiabilidad y prevenir de costosos fallos. Las palas más grandes están sujetas a una mayor probabilidad de sufrir daños operativos y defectos de fabricación. Esto es aún más evidente si se supone que los costes de operación y mantenimiento de una vida útil de 20 años para una sola turbina podrían representar alrededor del 75% al 90% de la inversión de capital de la turbina. Si bien los defectos de diseño pueden diseñarse para reducir la probabilidad de fallas, los defectos de fabricación pueden ocurrir al azar en cuanto a tipo, tamaño y ubicación. Los defectos de fabricación no se pueden detectar mediante inspección visual, lo que crea una necesidad creciente de técnicas de ensayos no destructivas que sean capaces de escanear las palas en grandes áreas para identificar la presencia o ausencia de estos defectos (Martin et al., 2018).

El monitoreo de la salud estructural (*Structural Health Monitoring*, SHM) es un proceso que utiliza estas técnicas para monitorear continuamente el estado de las estructuras y detectar cualquier daño o defecto (Aminzadeh et al., 2023). Además, todas las turbinas tienen que funcionar en diversas condiciones, entre ellas agua salada, partículas de arena, insectos, rayos, rayos ultravioleta, formación de hielo y temperaturas frías o calientes, dependiendo de la ubicación geográfica de las instalaciones de energía eólica. Estos factores repercuten en la estructura, debiendo además ser inspeccionados periódicamente los aerogeneradores para comprobar que están funcionando correctamente y, por tanto, produciendo la energía estimada y satisfacer la demanda de electricidad. En otras palabras, la inspección se puede utilizar para detectar defectos en una estructura antes de que ocurra un fallo y evitar paradas en la producción de energía, ya que la minimización de estos costes es muy importante (Dimitrova et al., 2022).

El mantenimiento de turbinas y palas eólicas se basa actualmente en inspecciones manuales y visuales. Las inspecciones in situ consumen mucho tiempo y/o altos riesgos humanos. En ambos casos, los resultados de las inspecciones dependen de la capacidad de los técnicos para detectar la indicación/daño de la hoja a simple vista. Por lo tanto, existe una importante necesidad de métodos alternativos que permitan realizar estas inspecciones de manera más rápida y eficiente, como los métodos de pruebas no destructivas sin contacto (Galleguillos et al., 2014).

Cualquier sistema de inspección que se implemente a gran escala debe ser capaz de escanear un área grande rápidamente, eficaz para identificar defectos y relativamente económico; de lo contrario, no se adoptará el enfoque de detección (Martin et al., 2018).

Yang & Sun, 2013 analizan técnicas como pruebas de fatiga, donde mediante excitación por resonancia reducen el coste y el tiempo necesarios para realizar una prueba de fatiga de vida completa y pruebas a gran escala para una rápida captura de datos in situ, entre otras. Además analizan pruebas de inspección no destructivas mediante un sistema de sensores que monitoreará continuamente, advertirá sobre el inicio de daños y proporcionará información instantánea que puede usarse para regular, reducir o prevenir daños. Afirman que las tecnologías de prueba/inspección no destructivas y sin contacto se convertirán en áreas de investigación prioritarias. Tienen grandes ventajas en las pruebas e inspección en línea. Además, indican que muchas publicaciones han demostrado que los métodos se convertirán en la tecnología más potencial para identificar los diversos patrones de daño

de las palas. Yang & Sun hacen referencia a que una gran ventaja de utilizar FEM (análisis de elementos finitos) es la notable reducción del coste de las pruebas, la inspección y el seguimiento de las palas de los aerogeneradores.

Galleguillos et al. (2014) en su estudio dejan ver que las inspecciones termográficas han demostrado una detectabilidad del 100% de los defectos inducidos. Con ello, han demostrado la viabilidad de la metodología de inspección propuesta para detectar los defectos más comunes durante el funcionamiento de las palas en servicio, como grietas, delaminaciones e impactos. Los estudios realizados durante las operaciones de vuelo han revelado el potencial de los reconocimientos aéreos, detectando en estos casos indicios estructurales relevantes, y en inspecciones en poco tiempo (15-20 min/pala). Los vuelos se han realizado en modo piloto automático, evitando riesgos operativos derivados del control tripulado.

Martin et al. (2018) destacan que aunque los beneficios específicos de la termografía varían según la técnica, la termografía infrarroja (IRT), en general, ofrece varias ventajas que incluyen mayor velocidad de inspección, mayor resolución y sensibilidad, mejor detección de defectos del subsuelo y deterioro dentro de la estructura que no se pueden observar con otras técnicas utilizadas tradicionalmente. El motivo principal, sin embargo, es la posibilidad de avanzar en el uso de un método que permita visualizar la presencia de un defecto de forma clara e intuitiva, que no requiera formación específica ni habilidades avanzadas de análisis, de manera que las personas que trabajan en la postfabricación de palas de aerogeneradores en la etapa de control puedan evaluar la calidad de la hoja fácilmente. Las tendencias actuales en la investigación también están demostrando que los sensores ópticos y basados en la visión son técnicas que tienen un mayor potencial para convertirse en métodos de inspección preferidos.

Uno de los resultados principales de esta investigación es que las mediciones realizadas utilizando las 3 técnicas (radar de apertura sintética inversa de terahercios, termografía infrarroja e imágenes de rayos X) son extremadamente rápidas de realizar una vez que se han preparado las muestras. Es una característica muy deseada ya que se deben escanear grandes superficies, como en el caso de la turbina a escala de servicios públicos. Los sistemas analizados pueden examinar un panel en unos pocos minutos y el proceso se puede repetir automáticamente para una caracterización completa de la muestra. Aunque también se ha demostrado que un calentamiento constante y lento de las muestras produce mejores resultados que la termografía flash a pesar del tiempo más largo para proporcionar una diferencia apreciable de temperatura entre diferentes áreas del objeto de prueba. Por el contrario, la obtención de imágenes por rayos X es rápida y permite escanear áreas que tienen dimensiones similares a las de las muestras en unos pocos segundos.

Rizk et al. (2020) indican que la inspección visual depende del técnico y las habilidades para inspeccionar la estructura de la pala. Esta técnica tiene como desventajas que requiere mucho tiempo y que no puede proporcionar buena visibilidad en algunas condiciones climáticas. Para el monitoreo de palas de turbinas eólicas, en este artículo se propone la técnica de imágenes hiperespectrales (*HyperSpectral Imaging*, HSI). HSI es el método de inspección inminente de las palas de la turbina eólica que proporcionará un menor período de parada para la inspección, menos costes de mantenimiento

y una baja frecuencia de averías repentinas al proporcionar una inspección regular sencilla de la pala de la turbina eólica.

Dimitrova et al, (2022) también afirman que la inspección visual por parte de un trabajador mediante cuerda o plataforma requiere mucho tiempo y siguen siendo costosos y consumen mucho tiempo (Ilustración 18). Algunos de estos métodos, como la inspección de cuerdas, plantean riesgos de seguridad para los trabajadores.



Ilustración 18. Inspección visual realizada por trabajadores. Fuente: Dimitrova et al. (2020)

Sin embargo, el uso de métodos de inspección remota mediante drones (Ilustración 19), más flexibles, rápidos, económicos y seguros, puede limitar el número de defectos detectados mediante inspección o afectar a su clasificación. A pesar de estas limitaciones, la inspección con drones tiene ventajas innegables la ventaja de proporcionar una idea rápida y rentable del número de defectos y su distribución en un parque eólico. Aunque el uso de drones no tiene la misma precisión, todos coinciden en que permite inspeccionar un mayor número de palas al mismo tiempo, limitando las intervenciones directas sólo a las necesarias para reparaciones.



Ilustración 19. Inspección visual realizada por drones. Fuente: Dimitrova et al. (2020).

La inspección visual mediante un dron es rápida y segura, permitiendo el acceso a áreas restringida. Monitorear de forma remota los cambios físicos y electroquímicos que tienen lugar en los materiales. Los datos recopilados pueden ayudar a diagnosticar la presencia de defectos en la pala y planificar reparaciones. La ventaja de este método es que los datos se pueden visualizar en vivo y el defecto/fallo emergente se puede conocer de antemano.

Es imprescindible crear una infraestructura resiliente y promover una industrialización inclusiva y sostenible, así como fomentar la innovación. Al operar en un parque eólico, es importante evitar paradas no planificadas porque, además de los costes de reparación, los operadores pierden ingresos mientras las turbinas no funcionan.

Por lo tanto, el mantenimiento predictivo debe utilizar una gran cantidad de datos para crear una base de datos sobre la turbina y sus condiciones ambientales para detectar anomalías en el funcionamiento y fallas tempranas. De esta manera, se puede reducir el riesgo de fallos y las operaciones se pueden gestionar de manera eficiente. Se deben crear sistemas integrados de monitoreo de condición (*Continuous Monitoring System, CMS*) y nuevos métodos para el procesamiento de datos aprovechando los beneficios de los nuevos desarrollos tecnológicos en el sector energético, así como en el área de las tecnologías de la información y la comunicación. Las tecnologías de la Industria 4.0 pueden ayudar a proporcionar soluciones tanto para las comunicaciones en turbinas eólicas como para la creación de redes en un parque eólico.

La revolucionada industria de la energía eólica requiere la aplicación de tecnologías de la Industria 4.0, como la fabricación inteligente, el Internet de las cosas (IoT), la inspección inteligente y los gemelos digitales. El método de inspección con drones destaca como la solución más segura para inspeccionar ya que puede equiparse con diferentes tipos de sensores y cámaras, brindando la

oportunidad de fusionar y agregar datos de diferentes fuentes utilizando técnicas de fusión de sensores. El uso de técnicas de fusión de sensores para una inspección inteligente en el marco del sistema Industria 4.0 proporciona información precisa sobre los componentes críticos de las palas de las turbinas eólicas. Se han realizado esfuerzos para reducir el impacto humano en la inspección y adaptarlos a la ciencia de datos. La inspección basada en datos permite un mantenimiento predictivo y, en consecuencia, una inspección inteligente.

Petersen et al. (2023) realizaron unas pruebas mediante exploración de referencia por tomografía de coherencia mediante rayos x en las que consiguieron reducir el tiempo de exposición a 10 segundos. Mediante este estudio concluyen que la tomografía de coherencia óptica tiene un potencial único para complementar los métodos existentes en el control de calidad de los recubrimientos de las palas de las turbinas eólicas, lo que puede contribuir a mejorar la vida útil de las palas de las turbinas, reducir los residuos y hacer que la producción de energía eólica sea más barata y fiable.

Aminzadeh et al. (2023) investigan sobre TIND 4.0, una forma avanzada de TIND que combina el poder del Internet de las cosas (IoT), el análisis de big data y los algoritmos de aprendizaje automático (ML) para mejorar la precisión y la velocidad de las inspecciones.

Permite la recopilación y el análisis de datos en tiempo real, lo que permite la detección temprana de problemas potenciales y facilita el mantenimiento predictivo. Los métodos de TIND se utilizan comúnmente en programas de inspección regulares, particularmente para piezas y componentes críticos que no requieren desmontaje para proporcionar un acceso adecuado durante las pruebas; sin embargo, las TIND se pueden realizar durante el tiempo de inactividad del equipo o durante el desmontaje. Por lo tanto, existe una demanda creciente de técnicas de END que inspeccionen piezas en condiciones de funcionamiento.

Una de las áreas de interés de los fabricantes es la automatización del proceso de fabricación para reducir el tiempo del ciclo, aumentar la precisión y la repetibilidad y reducir los costes. Para garantizar la precisión y la calidad de las palas, los fabricantes pueden utilizar herramientas avanzadas de metrología, inspección, pruebas y control de calidad para validar y verificar la calidad de las palas.

La estrategia de inspección es un elemento clave para garantizar el éxito de los objetivos de producción dentro de un cronograma específico. Está influenciado por varios factores, como la planificación de la producción, las necesidades de la industria, la planificación de procesos y la capacidad de fabricación. El éxito de una estrategia de inspección depende de las capacidades y recursos tecnológicos disponibles. Por lo tanto, la estrategia de inspección debe diseñarse de acuerdo con la capacidad productiva de la fábrica, el equipo de procesamiento y las limitaciones del proceso de fabricación. La planificación de procesos es crucial en el desarrollo de una estrategia de inspección, ya que implica determinar los detalles de las operaciones de producción y montaje en función de capacidades y diseño.

Es importante señalar que una estrategia de inspección bien diseñada se basa en la integración efectiva de medidas de control de calidad en todo el proceso de fabricación. Las estrategias de inspección eficaces proporcionan una ventaja competitiva en la industria, garantizan que los objetivos de producción se alcancen dentro del cronograma especificado, se mantenga la satisfacción del cliente y se aumente la rentabilidad. Al priorizar las actividades de mantenimiento y reparación, se puede aumentar la confiabilidad y eficiencia generales de la turbina eólica y se puede reducir el costo de mantenimiento.

Si bien los métodos de contacto proporcionan datos y resultados de inspección más confiables, el acceso a la hoja puede ser difícil y requerir equipo especializado, como un escalador industrial o una grúa, lo que puede ser peligroso y consumir mucho tiempo. Los métodos de inspección sin contacto, por otro lado, son más flexibles y permiten inspeccionar las palas de las turbinas eólicas in situ sin una preparación prolongada. El uso de métodos sin contacto reduce el tiempo de inactividad de las turbinas eólicas y el mantenimiento se puede realizar con menos personal.

La termografía se puede utilizar para inspeccionar las palas de la turbina in situ sin una preparación prolongada, lo que reduce el tiempo de inactividad de las turbinas eólicas y la necesidad de personal. Sin embargo, la lenta velocidad del desarrollo de la temperatura puede limitar el diagnóstico temprano de fallas mediante termografía. La combinación de termografía infrarroja y sistemas aéreos no tripulados puede reducir los tiempos de inspección para evaluaciones a corto plazo.

La integración de métodos de inspección no destructiva sin contacto con tecnologías de la Industria 4.0, como el Internet de las cosas (IoT), la robótica y la inteligencia artificial, puede ayudar a prolongar la vida útil de la hoja y reducir la necesidad de reparaciones costosas. Mejora la velocidad y precisión de las inspecciones. Esto puede ayudar a reducir los tiempos de inspección y mejorar la eficiencia general de la generación de energía eólica. También a reducir la necesidad de recopilación y análisis de datos manuales, ahorrando tiempo y reduciendo el riesgo de errores.

Se pueden utilizar para monitorear continuamente el estado de las palas de las turbinas eólicas y predecir posibles fallas antes de que ocurran. Esto puede ayudar a prevenir tiempos de inactividad inesperados y reducir los costes de mantenimiento. Sin embargo, también existen desafíos para integrar los métodos de TIND con las tecnologías de la Industria 4.0, como la necesidad de experiencia especializada, el costo de implementar nuevas tecnologías y la necesidad de métodos de inspección confiables.

La adopción de la sostenibilidad de las turbinas eólicas por parte de la Industria 4.0 será cada vez más importante, ya que permite una gestión eficiente de los activos, reduce el tiempo de inactividad y mejora la eficiencia operativa.

A continuación, en la Tabla 4, se muestran a modo resumen las técnicas analizadas por los autores y las ventajas que implica la implementación de las técnicas de inspección no destructivas desde el punto de vista de la logística.

Tabla 4. Puntos clave tratados en los artículos. Fuente: Elaboración propia.

Artículo	Técnicas analizadas y clasificación de los autores	Ventajas logísticas de la implementación de TIND
Yang & Sun (2013)	<p>Pruebas de propiedades mecánicas: Pruebas estáticas, pruebas de fatiga y pruebas modales.</p> <p>Pruebas a gran escala.</p> <p>Pruebas de inspección no destructivas: Inspecciones acústicas, termografía infrarroja e imágenes de rayos X.</p>	<p>Aumenta el ciclo de vida de los componentes.</p> <p>Reduce costes.</p> <p>Reduce tiempos de inspección.</p> <p>Regula, reduce o previene daños.</p>
Galleguillos et al. (2014)	<p>Pruebas de inspección no destructivas: Sistemas aéreos no tripulados y termografía infrarroja.</p>	<p>Se realizan inspecciones más rápido y eficiente.</p> <p>Alta detectabilidad de defectos.</p> <p>Reduce tiempos de inspección.</p>
Martin et al. (2018)	<p>Pruebas de inspección no destructivas: Radar de apertura sintética inversa de terahercios, termografía infrarroja e imágenes de rayos X.</p>	<p>Reducir costes de mantenimiento.</p> <p>Mayor velocidad de inspección, resolución y sensibilidad.</p> <p>Desarrollo automático.</p>
Rizk et al. (2020)	<p>Pruebas de inspección no destructivas: sistema de imágenes hiperespectrales.</p> <p>Otras técnicas mencionadas de manera teórica: Inspección visual, técnica de ultrasonido, onda guiada, emisión acústica, prueba de toque, infrarrojo sónico, termografía, análisis de vibraciones, prueba de corrientes de Foucault, terahercios, curva de potencia.</p>	<p>Detección temprana de daños para reducir el mantenimiento y costes.</p> <p>Aumento de la vida útil de los componentes.</p> <p>Menor periodo de parada para realizar la inspección.</p> <p>Reducción de los costes de mantenimiento.</p> <p>Reducción de averías repentinas.</p>

Artículo	Técnicas analizadas y clasificación de los autores	Ventajas logísticas de la implementación de TIND
Dimitrova et al. (2022)	<p>Inspección en superficie: Visión de máquina, inspección por drones, inspección de turbinas eólicas marinas.</p> <p>Inspección del subsuelo: Termografía, imágenes de rayos X, inspección por escaneo láser 3D, técnica ultrasónica, técnicas de imágenes hiperespectrales.</p> <p>Inspección mediante uso de sensores: análisis de vibraciones, emisión acústica.</p>	<p>Minimización de costes de mantenimiento e inspección.</p> <p>Inspección más flexible, rápida y económica.</p> <p>Inspección segura con menores riesgos laborales.</p> <p>Reducción del número de fallos y gestión eficiente de las operaciones.</p> <p>Mejora en los procesos de fabricación gracias a información más precisa.</p> <p>Reducir el impacto humano en la inspección.</p>
Petersen et al. (2023)	<p>Pruebas de impacto.</p> <p>Sistemas de tomografía de coherencia óptica de rayos X.</p>	<p>Reducción del tiempo de inspección.</p> <p>Aumento de la vida útil de los componentes.</p> <p>Reducción de residuos.</p> <p>Producción más asequible económicamente.</p>

Artículo	Técnicas analizadas y clasificación de los autores	Ventajas logísticas de la implementación de TIND
Aminzadeh et al. 2(023)	<p>Pruebas de inspección no destructivas: Termografía, pruebas radiográficas, visión artificial, pruebas de shearografía láser, pruebas por microondas.</p> <p>Integración de TIND con Industria 4.0.</p>	<p>Reducción de reemplazos costosos/Reducción de costes.</p> <p>Implementación de inspección permanente y automática.</p> <p>Se pueden realizar durante el tiempo de inactividad del equipo o durante el desmontaje.</p> <p>Reducción del tiempo de ciclo y de inspección.</p> <p>Aumento de la precisión y repetibilidad.</p> <p>Desarrollo de planes estratégicos que mejoran de la planificación de producción y la calidad del proceso de fabricación.</p> <p>Ventaja competitiva en la industria.</p> <p>Reducción del tiempo de inactividad y realización de mantenimiento con menor personal.</p> <p>Gestión eficiente de los activos y mejora de la eficiencia operativa.</p>

Después de revisar el estado actual de la implementación de técnicas de inspección no destructivas y las ventajas que conlleva desde el punto de vista de la logística, se ha podido observar:

- Importancia del buen funcionamiento y mantenimiento de los componentes de los aerogeneradores: La mayoría de los autores realizan sus estudios a partir de las palas de las turbinas eólicas, componentes críticos y muy costosos que representan una parte significativa del coste total de producción de una turbina. Dado que las palas capturan la mayor parte de

la energía del viento, su diseño, fabricación y mantenimiento adecuados son esenciales para la eficiencia y la seguridad de las turbinas.

- Necesidad de realizar inspecciones regulares: Con el aumento en el tamaño de las palas para mejorar la eficiencia energética, se ha vuelto crucial realizar inspecciones regulares para detectar defectos y prevenir fallos. La detección temprana de defectos puede ayudar a evitar costosas reparaciones y tiempos de inactividad no planificados.
- Desarrollo de tecnologías de inspección avanzadas: Es necesario implementar métodos de inspección no destructivos y sin contacto que puedan escanear grandes áreas de las palas de manera rápida, precisa y económica. Tecnologías como la termografía infrarroja, la tomografía de coherencia óptica y el uso de drones están demostrando ser prometedoras para este propósito.
- Integración de las técnicas con tecnologías de la Industria 4.0: La combinación de tecnologías de inspección avanzadas con la Industria 4.0, como el Internet de las cosas (IoT) y la inteligencia artificial, puede mejorar la eficiencia de las inspecciones reduciendo su tiempo de inspección, permitir el mantenimiento predictivo y prolongar la vida útil de las turbinas eólicas.
- Importancia de la sostenibilidad y la eficiencia operativa: La adopción de prácticas sostenibles y tecnologías de la Industria 4.0 puede mejorar la gestión de activos, reducir el tiempo de inactividad y mejorar la eficiencia operativa de los parques eólicos, lo que contribuye a una generación de energía más confiable y rentable.

El desarrollo y la implementación de tecnologías de inspección avanzadas, junto con la integración de conceptos de la Industria 4.0, son fundamentales para garantizar la confiabilidad, la seguridad y la eficiencia de las turbinas eólicas en el futuro.

Capítulo 5 Análisis económico de costes

En el sector de la energía eólica, la implementación de técnicas de inspección no destructivas representa un aspecto crucial para ayudar a garantizar la integridad y el rendimiento óptimo de las torres eólicas, tal y como se ha podido ver en los capítulos anteriores.

Por ello, en el presente capítulo, se realiza un análisis sobre los costes asociados a la fabricación de torres eólicas, que conforman una parte fundamental entre los componentes de los aerogeneradores así como los costes asociados a la implementación de técnicas de inspección no destructivas y se realiza una comparativa entre los costes de técnicas de inspección automatizadas y manuales.

5.1 Costes asociados a la fabricación de Torres Eólicas

A pesar de que se ha podido observar que las palas de las turbinas eólicas son el foco de atención y de estudio de los autores en cuanto a las investigaciones analizadas sobre el campo de estudio actual, cabe destacar también como componente crítico las torres eólicas.

Estas estructuras desempeñan un papel fundamental en el aprovechamiento eficiente de la producción de energía eólica. Las torres proporcionan la altura necesaria para obtener la fuerza del viento y la estructura para soportar el peso y la fuerza que ejerce el viento sobre otros componentes. De igual manera que las palas, las torres eólicas están expuestas a diversos factores, como por ejemplo el clima, por lo que requieren de especial atención para conseguir optimizar y mejorar la producción de energía eólica así como la calidad de los componentes y procesos necesarios durante todo su ciclo de vida.

Las torres contribuyen al coste porcentual más alto de todos los componentes principales de las turbinas eólicas entre un 25 y un 30% del coste total, cifras similares tanto para las torres terrestres como para las torres marinas.

En la Ilustración 20 se muestra el proceso de producción de las torres eólicas, que comienza con la obtención de materiales y está compuesto por procesos de corte y biselado, doblado, soldadura, granallado, metalizado, pintura, ensamblado y embalaje.

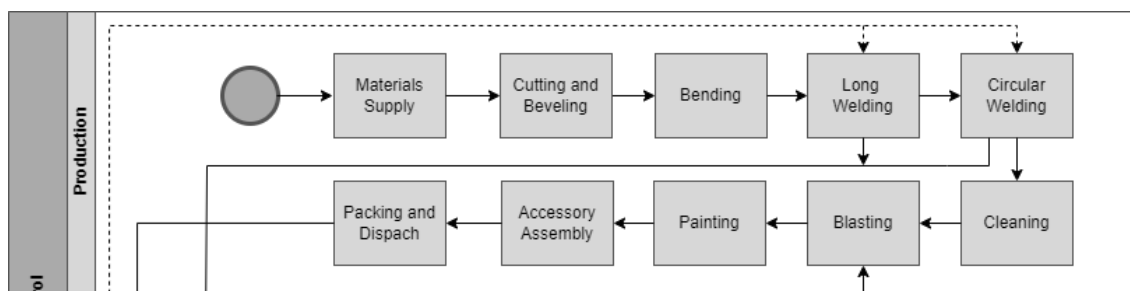


Ilustración 20. Proceso de producción de torres eólicas. Fuente: GLWN (2014).

El proceso de producción de las torres eólicas, mostrado en la Ilustración 20, supone de los siguientes tiempos que se muestran en la Tabla 5 en cada uno de los procesos que lo componen:

Tabla 5. Tiempo de realización de cada etapa en el proceso de producción de una torre eólica. Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída de GLWN (2024).

Etapa productiva	Tiempo
Suministro de materiales	3 h/torre
Corte y biselado	5 h/torre
Doblado	3,5 h/torre
Soldadura longitudinal	7 h/torre
Soldadura circular	19 h/torre
Granallado	9 h/torre
Metalizado	4 h/torre
Pintura	22 h/torre
Tiempo Total	72,5 h/torre

Actualmente, existen tres grandes proveedores de torres eólicas: Estados Unidos, China y Alemania (Tabla 6).

Tabla 6. Ventas anuales y Torres construidas en 2021 por EEUU, China y Alemania. Fuente: GLWN (2014).

País	Ventas anuales de Torres (2021)	Torres construidas (hasta 2021)
EEUU	\$200M	2200
China	\$320M	6100
Alemania	\$90M	1200

En la Ilustración 21 se puede observar el desglose de costes en porcentaje de dólares de cada uno de los principales proveedores de torres eólicas dividido en 8 campos: aranceles, beneficios, logística al puerto de EEUU, ingeniería, gastos administrativos, carga, mano de obra y materiales.

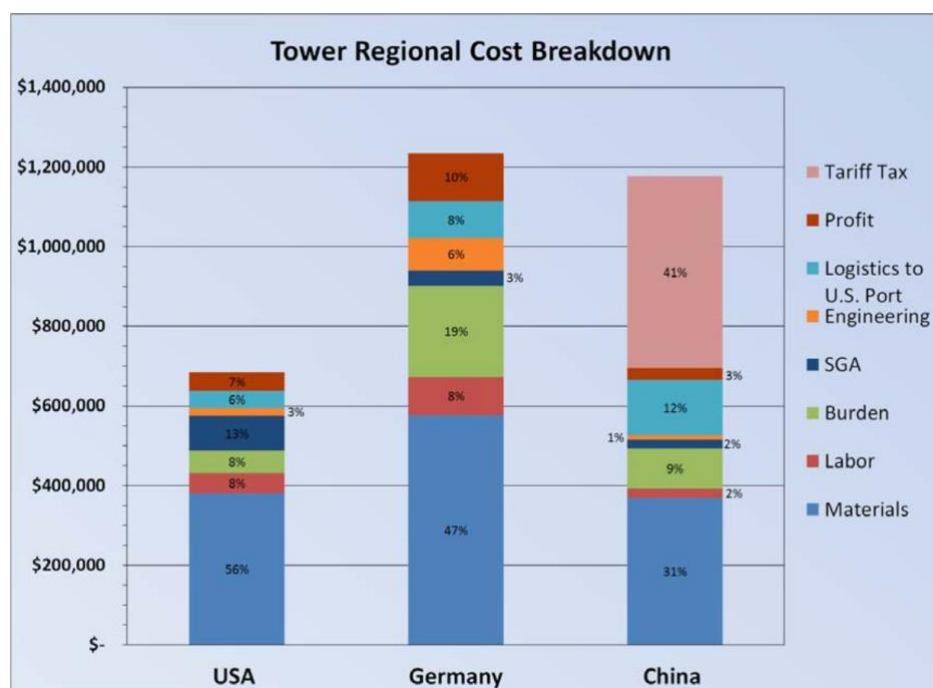


Ilustración 21. Desglose de costes totales de cada proveedor en porcentaje. Fuente: GLWN (2014).

Según se muestra en la Ilustración 21, la presencia de un arancel promedio del 92% en las torres importadas desde China genera una marcada ventaja para los proveedores chinos, incrementando el coste final para los compradores estadounidenses (OEM) en casi el doble del precio original. Estos

impuestos solo se aplican a China y es un promedio del 92% para los dos proveedores de China en este estudio. Este arancel ha impedido el suministro de torres a EEUU.

El material es el mayor generador de costes en todas las regiones y alcanza un 50% o ligeramente más si se elimina el arancel/impuesto a los proveedores de China. El costo de material más bajo se encuentra en China, con Estados Unidos con un +8% y Alemania con un +63% respecto a sus totales. En este caso se observa claramente que cuando la materia prima no se encuentra en el país de origen, como es en el caso de Alemania, el hecho de tener que adquirirla de países externos hace que los costes de transporte aumenten, lo que repercute directamente en los costes de materia prima, haciendo que estos sean mucho más elevados que en el caso de Estados Unidos o China. Por otra parte, el gasto administrativo de EEUU está bastante por encima del de Alemania y China, siendo este de 13% y del 3% para ambos, respectivamente (GLWN, 2014).

En general, la I+D debería centrarse en los materiales y la mano de obra y la carga. El coste de logística podría reducirse del 12% al 0% fabricando torres en una instalación de fabricación costera.

En cuanto al desglose de costes según los materiales utilizados, en la Ilustración 22 se pueden observar seis componentes principales: placa de acero, marco de la puerta, bridas de anillo forjado, pintura, pernos, arandelas y tuercas y alambre de soldadura. El coste de material es el más importante ya que supone poco más del 50% del coste de la torre. Los fabricantes de las torres necesitan optimizar el material y el tamaño de la placa para reducir el coste de fabricación total de la torre (GLWN, 2014).

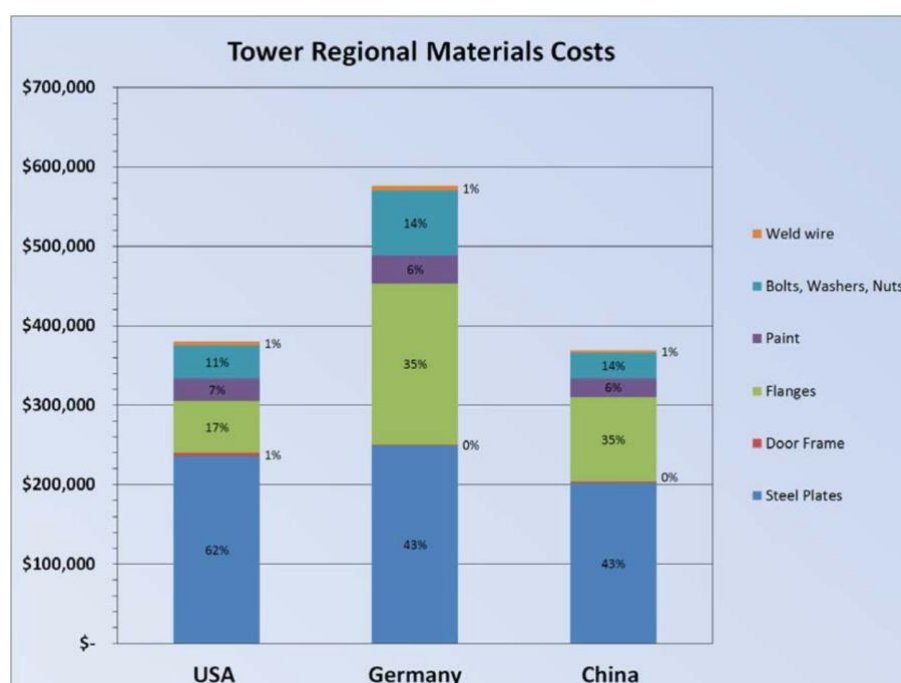


Ilustración 22. Desglose de costes de cada proveedor por materiales en porcentaje. Fuente: GLWN (2014).

Las placas de acero representan el 62% en EEUU, el 57% en China y el 43% en Alemania, pero Alemania tiene el coste total de las placas más alto, así como de producción total.

Las bridas de anillo forjado son el segundo mayor generador de costes, con un 17 % en EEUU, un 30 % en China y un 35 % en Alemania. Estos costes se podrían reducir rápidamente si se redujese la cantidad de bridas utilizadas en el diseño. En el caso de Estados Unidos, el porcentaje se diferencia significativamente de los otros dos competidores, teniendo este un valor mucho más reducido, debido al alto nivel de automatización de la fase de mecanizado que a su vez minimiza el coste de mano de obra gracias a la implementación y gran desarrollo de la Industria 4.0 que poseen (GLWN, 2014).

En la siguiente Ilustración 23 se muestra el desglose del coste de la mano de obra utilizada determinado por las horas/hombre realizadas en porcentaje de dólares y detallado en función de 18 parámetros:

- | | |
|--|---|
| 1. Manipulación, limpieza y limpieza de la placa. | 10. END, diputado. |
| 2. Capa de imprimación, impresión. | 11. Rollo y soldadura del marco de la puerta. |
| 3. Corte CNC. | 12. Soldadura por trampilla de bujes. |
| 4. Biselado. | 13. Voladura de arena. |
| 5. Laminado, soldadura por puntos y redondeo de latas. | 14. Pulverización de zinc. |
| 6. Soldadura longitudinal. | 15. Pintura final. |
| 7. Segundo lanzamiento. | 16. Instalación interna mecánica y eléctrica. |
| 8. Brida, carcasa, conjunto, control de calidad. | 17. Inspección final. |
| 9. Soldadura circular. | 18. Embalaje. |

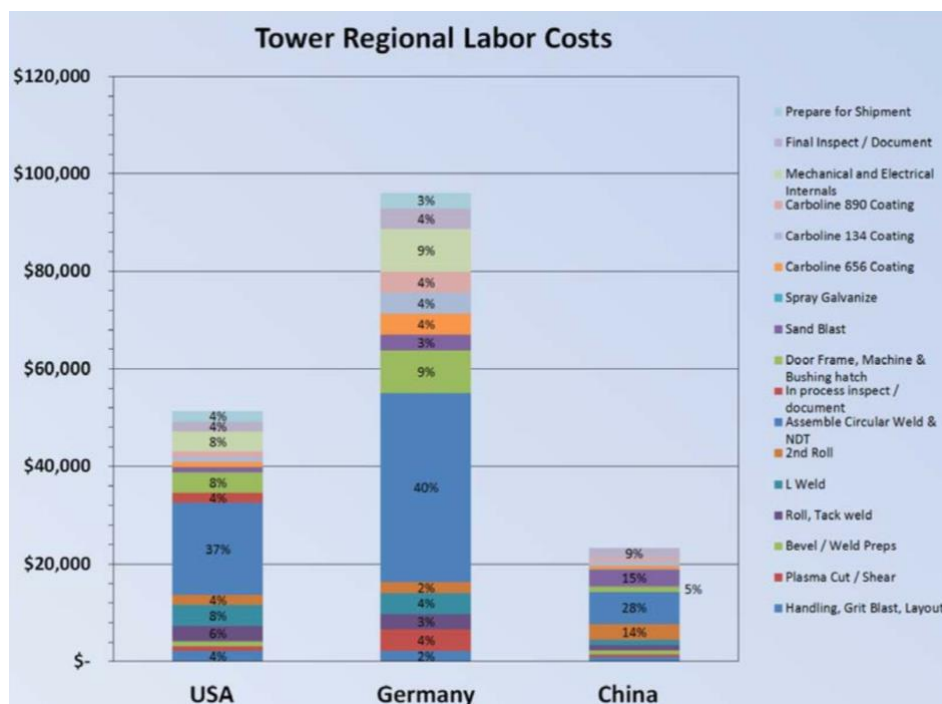


Ilustración 23. Desglose del coste de mano de obra de cada proveedor en porcentaje. Fuente: GLWN (2014).

La soldadura circular es el procedimiento con mayor costes del proceso y el cuello de botella en los procesos de fabricación (GLWN, 2014).

Respecto a los procesos de inspección, a pesar de que tanto para Estados Unidos como para Alemania se corresponde a un 4%, como el coste total de producción es más del doble para Alemania que para Estados Unidos, en términos monetarios el coste es mucho mayor para Alemania, ya que EEUU tiene implantados sistemas de inspección automatizados que consiguen reducir estos costes de inspección. Por otra parte, para el caso de China este coste es prácticamente nulo debido a que no realizan estos procesos de inspección.

Los fabricantes de torres en Estados Unidos se encuentran actualmente en una posición favorable en la producción de torres terrestres con respecto a las otras potencias: China y Alemania. En los últimos años, la industria ha sufrido una gran consolidación debido a la quiebra de algunos fabricantes, y la competitividad de los fabricantes chinos ha disminuido considerablemente debido a la imposición de un arancel promedio del 90% en 2013. Sin embargo, esta situación podría cambiar en unos años, por lo que los fabricantes deben mejorar la eficiencia de sus procesos y colaborar con los proveedores de acero para desarrollar láminas de acero más rentables, ya que estas representan entre el 25% y el 30% del costo total de una torre eólica terminada (GLWN, 2014).

Por ello, es importante considerar el panorama competitivo global. Alemania, aunque tiene los costes de producción más altos, ofrece tecnología y materiales de alta calidad, lo que puede atraer a mercados que priorizan la durabilidad y eficiencia. Por otro lado, China sigue siendo un proveedor dominante en términos de capacidad de producción y costes de mano de obra bajos, aunque los altos aranceles, ya mencionados anteriormente, han influido negativamente sobre su competitividad en este mercado.

5.2 Costes asociados a la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas

Los requisitos de calidad del cliente aumentan con el paso de los años. Por ello, las inspecciones manuales se vuelven cada vez más costosas. La confiabilidad, precisión y eficiencia de deserción de la inspección manual son bajas y dependen de la fatiga física y mental del operador, que aumentan debido a tener que realizar tareas repetitivas en el proceso de inspección.

La integración de tecnologías de inspección no destructiva (NDI) busca optimizar la producción y reducir el uso de energía y el consumo de materiales, al disminuir la cantidad de pruebas destructivas con fines de control de calidad, así como mantener a las empresas actualizadas en términos de las últimas tecnologías empleadas en el sector.

En el caso de las torres eólicas, los defectos de pintura aumentan los costes incurridos por los fabricantes y a su vez reducen la vida útil del producto. Los defectos de pintura en la estructura de una torre eólica pueden provocar un elevado impacto económico y pérdidas de reputación para los fabricantes de nivel del sector de la energía eólica.

El tiempo de inspección realizado en el proceso de pintura depende del número de operarios dedicados a esta tarea. Por lo general, el tiempo de inspección que realiza cada trabajador en una sección de la torre conlleva un total de 6 horas (Tabla 7).

Tabla 7. *Tiempo total de inspección en función del número de trabajadores. Fuente: Elaboración propia extraída de GLWN (2024).*

Tiempo de inspección de pintura por sección	Número de operarios	Total
6 h	3	18 h
6 h	2	12 h

Para conseguir reducir el coste de inspección en la etapa de pintura en ocasiones se busca minimizar la participación directa de los operarios durante el proceso, reducir el desperdicio de materiales utilizados mediante la detección de defectos durante la inspección.

La incidencia de elementos de no conformidad está estrechamente relacionada con el consumo de materiales y el uso de energía, y es un aspecto crucial de la sostenibilidad del proceso operativo. Un objetivo inherente de estas técnicas es reducir el flujo posterior de elementos de no conformidad durante operaciones posteriores. Para lograr esto de manera efectiva, deben integrarse perfectamente en el proceso de fabricación proporcionando mecanismos sólidos de garantía de calidad durante el proceso.

La calidad del proceso de pintura se puede mejorar si la inspección visual es realizada por un sistema de visión automatizado en lugar de la inspección realizada por operadores. Por ello, es importante implementar políticas de inspección basadas en un sistema de inspección automático con ayuda de la inteligencia artificial que sirva de soporte en procesos como la toma de decisiones, reducir el coste de inspección y minimizar la posibilidad de que productos defectuosos lleguen al cliente. La detección temprana de defectos evita que los artículos defectuosos pasen a los siguientes pasos de fabricación, lo que puede resultar en pérdidas significativas de tiempo, materiales y dinero.

En función del tipo de políticas de inspección, muestreo y nivel de servicio al cliente, se pueden incurrir en diferentes tipos de costes. En este caso, el coste de las políticas de inspección está directamente relacionado con cinco factores principales: la tipología de inspección (en línea o fuera de línea, el tipo de inspección, la cantidad de producto inspeccionado, el tiempo del ciclo y la naturaleza de la inspección). Calcular el coste del producto es una tarea fundamental para verificar el verdadero impacto que supone implementar las soluciones de técnicas de inspección no destructivas en el desempeño del proceso operativo. En función del tipo de solución implementada se puede ver afectado de una manera u otra el coste del equipo, el retorno de la inversión (ROI) y el periodo de recuperación (PbP).

A continuación, se examinará una solución de inspección visual automatizada en el proceso de pintura de las torres eólicas que afecta en los costes obtenidos y que consiste en la instalación de tres cámaras en el equipo de inspección visual automatizada.

Esta solución consta de tres componentes:

- Sensores de cámaras: compuesto de 6 cámaras, un sensor CMOS, 20 megapíxel, una fuente de alimentación de 6 V y espectro visible
- Lente óptica: compuesto por 6 lentes, una longitud focal de 25mm y un campo de visión de 30x20cm.
- Fuentes de luz: compuesta por 12 luces de barra LED, una longitud de barra de 500mm y una fuente de alimentación de 12 V.

Para ello, el coste del equipo automatizado se ha desglosado en costes de hardware, de adquisición de datos, de etiquetado, de modelos de aprendizaje automático y de desarrollo de software, según se muestra en la Tabla 8. El coste de adquisición de datos depende del tiempo medio necesario para detectar y registrar un defecto de pintura y en función de la tasa de mano de obra utilizada, de igual forma para el cálculo del coste de etiquetado.

Tabla 8. Desglose de costes del equipo de inspección visual automatizada. Fuente: Elaboración propia.

Componentes elementales	Costes (€)
Hardware	40.742
<i>Sensor óptico</i>	1.587
<i>Lente óptica</i>	1.957
<i>Fuente de luz</i>	3.941
<i>PLC/HMI</i>	2.800
<i>AGV</i>	22.000
<i>CPU/GPU</i>	4.000
<i>Otros</i>	4.457
Adquisición de datos	9.100
Etiquetado	3.033
Modelo de aprendizaje automático	2.474
Desarrollo de software	25.000
Total	80.350

El coste de mano de obra tiene en cuenta el tiempo que se tarda en realizar la inspección del proceso de pintura, el precio de la tarifa horaria europea y los beneficios laborales directos que se generan. Los costes indirectos tienen en cuenta diferentes costes como los capitalizados y gastos administrativos imputables.

En la siguiente Tabla 9 se puede observar cómo en un proceso de inspección manual el coste de la mano de obra supone más del 65% de los costes totales. En cambio, en el proceso automatizado se reduce drásticamente al aproximadamente 3% de los costes totales. En el caso de la inspección automatizada es el total de los costes indirectos lo que supone el mayor porcentaje de coste respecto a los totales, llegando a ser del +95% sobre el total.

Tabla 9. Desglose de costes de la inspección manual y automatizada del proceso de pintura. Fuente: Elaboración propia.

Tipos de costes	Costes inspección manual (€)	Costes inspección automatizada (€)
Costes directos (€/ud)	664	7
<i>Mano de obra directa (€/ud)</i>	<i>549</i>	<i>6</i>
<i>Beneficios laborales directos (€/ud)</i>	<i>115</i>	<i>1</i>
Costes indirectos (€/ud)	151	206
Costes capitalizados (€/ud)	85	183
<i>Costes del sistema de visión automática (€/ud)</i>	<i>0</i>	<i>98</i>
<i>Costes operativos de instalación (€/ud)</i>	<i>85</i>	<i>85</i>
Costes distribuidos (€/ud)	0	20
<i>Costes de equipos de visión automática (€/ud)</i>	<i>0</i>	<i>20</i>
Gastos generales y admvos (€/ud)	66	3
Total (€/ud)	816	214
Producción total (ud/año)	196	196
Retorno de la inversión (ROI) (%)	N/A	122
Período de recuperación (PbP) (meses)	N/A	10
Velocidad de inspección (h/ud)	18	1,5

La fabricación de torres eólicas en Alemania tiene un coste aproximado de 1,200,000 € por unidad, según se detalla en la Ilustración 21. El tiempo requerido para completar el proceso de fabricación de una torre, conocido como Trabajo en Proceso (*Work In Process - WIP*), es de 72.5 horas por torre, lo que equivale aproximadamente a una semana de trabajo, de acuerdo con la información de la Tabla 5.

El proceso de inspección de pintura actual, realizado manualmente, consume 18 horas por unidad. No obstante, con la automatización de este proceso, el tiempo requerido se reduce significativamente a 1,5 horas por unidad. Esta automatización implica la implementación de un sistema compuesto por tres sensores de cámaras, optimizando considerablemente la eficiencia del proceso de inspección de pintura.

Tabla 10. Reducción del WIP en tiempo y costes al automatizar el proceso de inspección de pintura. Fuente: Elaboración propia.

Concepto	Inspección manual	Inspección automatizada
Tiempo de producción (WIP)	90,5 h/ud	74 h/ud
<i>Etapas productivas</i>	<i>72,5 h/ud</i>	<i>72,5 h/ud</i>
<i>Tiempo de inspección</i>	<i>18 h/ud</i>	<i>1,5 h/ud</i>
Reducción del tiempo de producción	-16,5 h/ud	
Costes de inventario (€/ud/sem)	5570 €/ud/sem	
Costes ahorrados en producción (€/ud/h)	-72,125 €/ud/h	
Costes ahorrados en producción (€/ud)	-1190 €/ud	

Con la introducción del sistema automatizado, el tiempo total de producción de una torre eólica se reduce de 90,5 horas a 74 horas por unidad. Esta mejora representa una reducción del WIP en más del 18% por torre fabricada, lo que implica una disminución significativa en el tiempo de producción y, consecuentemente, en los costes asociados.

El coste de inventariar una torre eólica se estima en aproximadamente el 25% del coste total de fabricación anual, según Heizer & Render (2004) en la Ilustración 24. Esto equivale a un coste semanal de 5770 € por unidad. Dado que se operan dos jornadas laborales al día durante cinco días a la semana, la automatización del proceso de inspección permite un ahorro de 1190 € por torre fabricada.

Además de los 1190 € ahorrados en el WIP, la automatización de la inspección reduce los costes en 602 € adicionales por torre (Tabla 9). En conjunto, esto se traduce en un ahorro total de 1792 € por unidad. Con una producción anual de 196 torres, según la Tabla 9, el ahorro acumulado supera los 350.000 € al año.

Categoría	Costo (y rango) como porcentaje del valor del inventario
Costos de edificio (renta o depreciación del edificio, costos de operación, impuestos, seguros)	6% (3–10%)
Costo por manejo de materiales (renta o depreciación del equipo, energía, costo de operación)	3% (1–3.5%)
Costo por mano de obra (recepción, almacenamiento, seguridad)	3% (3–5%)
Costo de inversión (costos de préstamos, impuestos y seguros del inventario)	11% (6–24%)
Robo, daño y obsolescencia (mucho más en industrias de cambio rápido como las computadoras personales y los teléfonos celulares)	3% (2–5%)
Costos globales por manejo	26%

Nota: Todas las cifras son aproximadas, puesto que varían en forma considerable según la naturaleza del negocio, su ubicación y las tasas de interés vigentes. Cualquier costo de mantener el inventario menor al 15% es dudoso, porque los costos anuales de mantener el inventario a menudo se acercan al 40% del valor del inventario y aún más en industrias de alta tecnología y moda.

Ilustración 24. Rangos de porcentaje de los costes de material inventariado. Fuente: Heizer & Render (2004).

La etapa de inspección, al no formar parte directa del proceso de fabricación, no aporta valor añadido al producto final y puede considerarse como un desperdicio. Por lo tanto, el objetivo es siempre minimizar su impacto. La automatización del proceso de inspección de pintura no solo reduce significativamente los tiempos y costes de producción, sino que también contribuye a la optimización global del proceso de fabricación de torres eólicas, generando importantes beneficios económicos y operativos.

En conclusión, la implementación de un sistema automatizado para la inspección de pintura en la fabricación de torres eólicas en Alemania representa una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia y reducir costes, lo que es crucial para mantener la competitividad en el sector de energías renovables.

5.3 Comparación entre la implementación de Técnicas de Inspección No Destructivas Manual y Automatizada

Como se puede observar en los resultados anteriores, los costes de mano de obra aumentan el coste total de la inspección de manera significativa. Además, las inspecciones realizadas de forma manual por operarios aumentan también los tiempos de inspección y entrega, por lo que se requiere de disponibilidad inventarios intermedios, lo cual también aumenta el coste final.

La precisión y consistencia son factores cruciales en cualquier tipo de inspección, por lo que el factor humano puede derivar en una falta de precisión debido a la fatiga visual, mental y física producida con el paso de las horas de inspección. En este contexto, los sistemas automatizados realizan inspecciones con alta precisión y consistencia, minimizando errores humanos y ofreciendo resultados reproducibles. Aunque los sistemas automatizados requieren ajustes y calibraciones iniciales, ofrecen una ventaja significativa en términos de consistencia y precisión a la hora de realizar la inspección, así como una reducción del tiempo de inspección bastante significativa, pasando de 18 horas en inspección manual a 1,5 horas en inspección automatizada, lo que conlleva a una reducción del WIP total de más de un 18% en tiempo.

Por otro lado, la inversión en sistemas de inspección automatizada tiende a ser intensiva en capital y se amortiza en un periodo de tiempo más largo, por ello es imprescindible centrar la atención en resultados que se obtendrán a largo plazo ya que los sistemas automatizados pueden inspeccionar rápidamente grandes áreas y realizar múltiples inspecciones simultáneamente, aumentando significativamente la eficiencia y reduciendo el número de no conformidades o aumentando la fiabilidad del fabricado, por lo que estos beneficios pueden considerarse ventajas competitivas en el sector. La implementación de estas técnicas automatizadas permite a las empresas reducir los costes operativos y de mano de obra, lo que en consecuencia reduce sus precios de venta.

La rentabilidad a largo plazo es un factor determinante ya que la inspección manual puede ser más rentable inicialmente debido a los bajos costes de inversión en equipos, sin embargo, a largo plazo los costes acumulados de mano de obra y la variabilidad en los resultados pueden hacerla menos rentable. En cambio, la inspección automatizada, a pesar de los altos costos iniciales, resulta más rentable a largo plazo debido a la reducción en costos operativos, mayor velocidad y eficiencia, y menor necesidad de intervención humana constante.

Capítulo 6 Objetivos de Desarrollo Sostenible y Energía Eólica

En el mundo actual, donde se destaca la preocupación por el cambio climático y la alta necesidad de transitar hacia un modelo energético más sostenible, el desarrollo y la implantación de fuentes de energía renovables, como la energía eólica, es clave en la búsqueda de soluciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover el desarrollo sostenible. La energía eólica no solo representa una alternativa limpia y renovable a las fuentes de energía tradicionales, sino que también desencadena una serie de impactos positivos en términos ambientales, económicos y sociales. Alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, el sector eólico juega un papel fundamental en la consecución de varias de las metas que se proponen.

Cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Ilustración 25) es esencial en la planificación, el desarrollo y las operaciones de proyectos, asegurando así un impacto positivo en el medio ambiente y la sociedad a largo plazo y puede desempeñar un papel crucial en la transformación hacia un futuro más sostenible.



Ilustración 25. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: ONU (2024).

La economía global dependiente de los combustibles fósiles y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero están generando cambios drásticos en nuestro sistema climático, cuyas consecuencias tienen impactos evidentes en el conjunto del planeta. A continuación, se exploran algunas razones clave por las cuales cumplir los ODS es importante en el contexto de la energía eólica:

- ODS 7: Energía asequible y no contaminante. La energía eólica contribuye a proporcionar acceso a una energía asequible y no contaminante para todos. Además de ser una fuente de energía limpia, el viento es un recurso natural abundante y gratuito, lo que ayuda a reducir los costes de producción de electricidad a largo plazo y el uso de combustibles fósiles. Esto puede conducir a una mayor accesibilidad a la energía eléctrica, especialmente en áreas remotas o rurales donde las redes eléctricas tradicionales pueden ser costosas de implementar.
- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura. La energía eólica fomenta la innovación en tecnologías de energía limpia y en el diseño y construcción de infraestructuras sostenibles. A medida que la tecnología eólica avanza, se vuelven más eficientes y rentables, lo que permite una mayor integración de la energía eólica en los sistemas energéticos globales. Además, la infraestructura necesaria para la generación de energía eólica, como parques eólicos y redes de transmisión, contribuye al desarrollo de infraestructuras modernas y resilientes.
- ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles. La energía eólica puede desempeñar un papel importante en la creación de ciudades y comunidades sostenibles al proporcionar una fuente de energía limpia y confiable para áreas urbanas. Los parques eólicos pueden integrarse en entornos urbanos y periurbanos, proporcionando una fuente local de energía renovable y reduciendo la dependencia de las áreas urbanas de los recursos energéticos no renovables.
- ODS 13: Acción por el clima. La energía eólica es una fuente de energía renovable que produce electricidad sin generar emisiones de gases de efecto invernadero. Al utilizar la energía del viento para generar electricidad, se reduce la dependencia de los combustibles fósiles, lo que a su vez ayuda a mitigar el cambio climático y a cumplir con los objetivos establecidos en el Acuerdo de París, un tratado internacional sobre el cambio climático adoptado en 2015 durante la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) cuyo objetivo es fortalecer la respuesta global al cambio climático al mantener el aumento de la temperatura media global muy por debajo de 2°C.

El creciente énfasis en el desarrollo industrial en la Unión Europea, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), demanda una reducción en el consumo de recursos por parte de gobiernos y empresas privadas. En este contexto, la industria debería focalizarse en el desarrollo e integración de soluciones basadas en el concepto de Cero Defectos y Cero Residuos (ZDZW). Esta estrategia busca la detección temprana de anomalías y fallos utilizando equipos de inspección y algoritmos de inteligencia artificial, evitando así la propagación de defectos en las etapas posteriores de producción.

Cumplir los ODS es esencial para garantizar un futuro sostenible y la energía eólica desempeña un papel importante en la consecución de varios de estos objetivos. Promover la implantación de la energía eólica como fuente de energía eléctrica puede ayudar a avanzar hacia un mundo más equitativo, próspero y respetuoso con el medio ambiente (ONU, 2024).

CONCLUSIONES

El presente trabajo de fin de máster ha tenido como objetivo principal analizar el impacto logístico y realizar un análisis económico de costes sobre la implementación de técnicas de inspección no destructivas en el sector eólico.

En primer lugar, la revisión de la evolución histórica del sector eólico y el uso de fuentes de energía renovables muestra un crecimiento sostenido y significativo a lo largo de las últimas décadas. El aumento de la capacidad instalada de energía eólica tanto terrestre como marina, junto con los avances tecnológicos, han consolidado esta fuente de energía como una de las más prometedoras para el futuro energético global. La Unión Europea realiza un papel crucial para fomentar y promocionar el desarrollo de la energía eólica, estableciendo políticas y objetivos ambiciosos para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y fomentar el uso de energías renovables, así como alcanzar los objetivos de sostenibilidad que demuestran el compromiso regional con la transición energética.

Tras realizar una revisión de la literatura enfocada en la implementación de técnicas de inspección no destructivas en la cadena de suministro y en los procesos operativos de la fabricación y mantenimiento de aerogeneradores se han dejado ver varios impactos logísticos significativos. Gracias a la implementación de estas técnicas, además de mejorar aspectos como el aumento de la confiabilidad de los componentes inspeccionados, la seguridad operativa de los aerogeneradores y el aumento de la vida útil de los componentes gracias a la mejora de la calidad por la detección temprana de defectos y el monitoreo continuo, también se consiguen mejoras en la eficiencia operativa en procesos de fabricación y mantenimiento mediante la detección temprana de defectos, la reducción de tiempos de inactividad y la reducción de costes logísticos al evitar fallos y permitir un mantenimiento más predictivo.

El análisis económico de costes asociados a la implementación de técnicas de inspección no destructivas revela que los beneficios a largo plazo en términos de reducción de fallos, mantenimiento y eficiencia operativa justifican la inversión. Las técnicas de inspección automatizadas, aunque suponen una mayor inversión inicialmente, ofrecen un retorno de inversión (ROI) más rápido y una mayor rentabilidad a largo plazo debido a su precisión, eficiencia y capacidad para operar en condiciones difíciles.

La implementación de técnicas TIND no solo es rentable a largo plazo en términos económicos sino que también contribuye a la sostenibilidad del sector, ya que al mejorar la eficiencia y reducir los fallos, las técnicas TIND contribuyen a la sostenibilidad del sector, minimizando los residuos generados y optimizando el uso de materiales alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible y reducción de la emisión de gases efecto invernadero.

En futuras investigaciones, se podría profundizar en el estudio de las tecnologías emergentes en técnicas de inspección no destructiva junto con el uso de inteligencia artificial y *machine learning* para el análisis de datos de inspección, ya que es un campo de estudio reciente que como se ha podido observar en los resultados obtenidos tras la revisión literaria no ha sido lo suficientemente investigado. La integración de estas técnicas junto con nuevos sistemas digitales y de automatización industrial podría maximizar los beneficios logísticos y económicos, creando un entorno de mantenimiento e inspección totalmente optimizado y basado en datos, que anticipe y responda a los problemas antes de que ocurran, mejorando así la resiliencia y sostenibilidad del sector eólico.

Con esto, se pretende que esta investigación y las conclusiones extraídas contribuyan al conocimiento actual y puedan servir como guía y precedente para continuar con esta rama de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Aminzadeh, A., Dimitrova, M., Meiabadi, M. S., Sattarpanah Karganroudi, S., Taheri, H., Ibrahim, H., & Wen, Y. (2023). Non-Contact Inspection Methods for Wind Turbine Blade Maintenance: Techno–Economic Review of Techniques for Integration with Industry 4.0. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42(2), 54.
- Azamfirei, V., Psarommatis, F., & Lagrosen, Y. (2023). Application of automation for in-line quality inspection, a zero-defect manufacturing approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.010>
- Dimitrova, M., Aminzadeh, A., Meiabadi, M. S., Sattarpanah Karganroudi, S., Taheri, H., & Ibrahim, H. (2022). A survey on non-destructive smart inspection of wind turbine blades based on industry 4.0 strategy. *Applied Mechanics*, 3(4), 1299-1326.
- Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., & Soni, A. (2018). Advances and researches on non destructive testing: A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3690-3698.
- European Commission (2020). An EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future.
- European Commission (2020). Renewable Energy Progress Report.
- European Commission (2022). REPowerEU Plan.
- European Commission (2022). Short-Term Energy Market Interventions and Long-Term Improvements to the Electricity Market Design – a course for action.
- Ferreira, R. M. R., García, X. R. D., & Amil, M. L. C (s/f). El sector eólico y el desarrollo de las energías renovables en la unión europea, china y japon: políticas de fomento y justificación energética y ambiental.
- Galleguillos, C., Zorrilla, A., Jimenez, A., Diaz, L., Montiano, Á. L., Barroso, M., ... & Lasagni, F. (2015). Thermographic non-destructive inspection of wind turbine blades using unmanned aerial systems. *16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014*.
- GLWN, G. W. N. (2014). *Us wind energy manufacturing and supply chain: A competitiveness analysis*. Technical report, US Department of Energy.

Heizer, J. H., & Render, B. (2004). *Principles of operations management*. Pearson Educación.

Iberdrola (2021). ¿Qué es la energía eólica, cómo se transforma en electricidad y cuáles son sus ventajas? Iberdrola. Recuperado de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>

International Atomic Energy Agency. (2024). Otros ensayos no destructivos. Recuperado de <https://www.iaea.org/es/temas/otros-ensayos-no-destructivos#:~:text=Además%20de%20la%20radiografía%20industrial,las%20inspecciones%20por%20corrientes%20inducidas.>

Lario, J., Mateos, J., & Ortiz, Á. (2023, July). Non-destructive Inspection Solutions in the EU Industrial Sector for Sustainable Manufacturing. In *International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (ICIEIM)–Congreso de Ingeniería de Organización* (pp. 13-17). Cham: Springer Nature Switzerland.

Lario, J., Mateos, J., Poler, R., & Ortiz, Á. (2023, September). Collaborative Network for the Development of Non-Destructive Inspection Technologies: Elicitation Requirements in an Industrial Environment. In *Working Conference on Virtual Enterprises* (pp. 589-605). Cham: Springer Nature Switzerland.

López, M. V. (2012). *Ingeniería de la energía eólica* (Vol. 5). Marcombo.

Martin, R. W., Sabato, A., Schoenberg, A., Giles, R. H., & Niezrecki, C. (2018). Comparison of nondestructive testing techniques for the inspection of wind turbine blades' spar caps. *Wind Energy*, 21(11), 980-996.

Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. (2019). *Agenda Sectorial de la Industria Eólica 2019*. Recuperado de https://industria.gob.es/es-es/Servicios/AgendasSectoriales/Agenda%20sectorial%20de%20la%20industria%20eólica/agenda-sectorial-de-la-industria-eolica_2019.pdf

Organización de las Naciones Unidas. (2024). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Petersen, C. R., Fæster, S., Bech, J. I., Jespersen, K. M., Israelsen, N. M., & Bang, O. (2023). Non-destructive and contactless defect detection inside leading edge coatings for wind turbine blades using mid-infrared optical coherence tomography. *Wind Energy*, 26(5), 458-468.

Powell, D., Magnanini, M. C., Colledani, M., & Myklebust, O. (2022). Advancing zero defect manufacturing: A state-of-the-art perspective and future research directions. *Computers in Industry*, 136(103596), 103596. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103596>

Recursos Científicos de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. Recursos científicos. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Recuperado de <https://www.recursocientificos.fecyt.es>

Rizk, P., Al Saleh, N., Younes, R., Ilinca, A., & Khoder, J. (2020). Hyperspectral imaging applied for the detection of wind turbine blade damage and icing. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100291.

SCI SERVICIOS DE CONTROL E INSPECCIÓN S.A. (s/f). SCI SERVICIOS DE CONTROL E INSPECCIÓN S.A; SCI Servicios de Control e Inspección. Recuperado el 11 de junio de 2024, de <https://scisa.es/>

Spiegeler, C., & Cifuentes, J. I. (2016). Definición e información de energías renovables. Edu.gt. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4455/1/DEFINICION%20E%20INFORMACION%20DE%20ENERGIAS%20RENOVABLES.pdf>

Ventura Ramos, K. E., & Hernández de la Cruz, A. (2019). Parque eólico San Jacinto 19.965 MW.

Yang, B., & Sun, D. (2013). Testing, inspecting and monitoring technologies for wind turbine blades: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 515-526.

