



**Universidad  
Europea** MADRID

**UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID  
ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA  
Y DISEÑO  
GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS  
INDUSTRIALES**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN  
PARQUE EÓLICO TERRESTRE**

**Alumna: D<sup>a</sup>. PAULA IRIA TABERNERO PAZOS  
Directora: D<sup>a</sup>. MARÍA JOSÉ TERRÓN LÓPEZ**

**FEBRERO 2022**

Paula Iria Tabernero Pazos

---

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN PARQUE EÓLICO TERRESTRE

**AUTORA:** PAULA IRIA TABERNERO PAZOS

**TITULACIÓN:** GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS INDUSTRIALES

**DIRECTORA DEL PROYECTO:** MARÍA JOSÉ TERRÓN LÓPEZ

**FECHA:** 3 de FEBRERO de 2022

## RESUMEN

En este proyecto se analizará de manera conceptual la capacidad de alargar la vida útil de los aerogeneradores, dentro de los parques eólicos.

Para ello, tras estudiar el contexto energético actual, se plantean los objetivos a corto plazo que se han desarrollado para trabajar hacia la eólica como una energía en la que poder sustentar la sociedad, exponiendo los conceptos clave para entender esta tecnología.

En segundo lugar, se plantean las condiciones de los terrenos, el impacto ambiental y el procedimiento llevado a cabo al instalar un parque, así como al desmantelarlo, y las opciones que existen a la hora de deshacerse de los aerogeneradores, viendo que el reciclaje es una opción viable instalando aerogeneradores de última generación.

A continuación, se estudia la capacidad de alargar la vida útil de los elementos para poder seguir explotando una instalación sin necesidad de realizar obras observando la posibilidad que tienen para reciclarse y reinsertarse en el mercado.

Finalmente, se plantea el impacto socioeconómico de este tipo de instalaciones y los costes de inversión y beneficios que repercutirán sobre las personas propietarias de los parques concluyendo que resulta rentable para ellos, y facilita la bajada del precio final de la electricidad para los consumidores en temporadas en las que se pueda disponer del recurso.

**Palabras clave:** energía eólica, reciclaje, reutilización, renovable, aerogeneradores.

## ABSTRACT

This project will conceptually analyze the ability of wind turbines, within wind farms, to extend their useful life.

In the first place, the current energy context is established, and the short-term objectives that have been developed to work towards wind power as an energy that can sustain society are set out. The key concepts to understand this technology are also exposed.

Paula Iria Tabernero Pazos

---

Secondly, the conditions of the land, the environmental impact and the procedure carried out when installing a park, as well as when dismantling it, and the options that exist when disposing of the wind turbines are considered, concluding that recycling is a viable option using last generation technology.

Next, the ability to extend the useful life of the elements in order to continue operating a facility without the need to carry out works is studied, and the possibility they have for recycling and reinsertion into the market.

Lastly, the socioeconomic impact of this type of facility and the investment costs and benefits that will affect the owners of the parks are considered, concluding that it is profitable for them, and facilitates the lowering of the final price of electricity for consumers in seasons in which the resource is available.

**Key words:** wind power energy, recycling, reusing, renewable, wind turbines.

# Índice

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	3
Índice de Figuras .....	8
Índice de Tablas .....	11
Capítulo 1. Introducción.....	12
1.1 Objetivos del Proyecto.....	12
1.2 Antecedentes.....	13
1.3 Economía circular.....	15
1.4 Energía renovable en España y en el mundo .....	16
1.5 Objetivos energéticos a corto plazo .....	18
1.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	19
1.7 La energía eólica y la red eléctrica.....	21
1.8 Energía eólica en la España peninsular .....	22
1.9 Normativa estatal y autonómica .....	25
Capítulo 2. Marco teórico .....	28
2.1 Conceptos generales.....	29
2.2 Tipos de aerogeneradores .....	31
2.3 Partes de los aerogeneradores .....	33
2.4 Cimentaciones.....	38

2.4.1	Cimentación de gravedad – acero .....	39
2.4.2	Cimentación de monopilote .....	39
2.4.3	Cimentación de trípode .....	39
Capítulo 3.	Explotación, desmantelamiento y repotenciación .....	40
3.1	Explotación .....	40
3.2	Desmantelamiento.....	41
3.2.1	Aerogeneradores .....	44
3.2.2	Residuos .....	45
3.3	Repotenciación.....	47
Capítulo 4.	Impacto ambiental.....	49
4.1	Fases del estudio .....	51
4.1.1	Preparación del terreno. ....	51
4.1.2	Explotación de la instalación.....	51
4.1.3	Desmantelamiento del parque .....	52
4.1.4	Resumen de impactos .....	53
4.1.5	Valoración de los impactos ambientales significativos .....	55
4.1.6	Medidas preventivas, correctivas y compensatorias .....	55
Capítulo 5.	Alargamiento de vida útil de un aerogenerador .....	59
5.1	Análisis de Ciclo de Vida (ACV de ISO 14040:2006).....	59
5.2	Mantenimiento predictivo.....	61
5.3	Lubricantes para alargamiento de la vida útil .....	65
Capítulo 6.	Reciclaje.....	68
6.1.1	Procedimiento físico.....	71

6.1.2	Procedimiento térmico .....	71
Capítulo 7.	Impacto socioeconómico.....	75
Capítulo 8.	Inversión.....	81
8.1	Parque eólico Arbequina (Zaragoza – Teruel) .....	81
8.2	Parque eólico Cascante II (Navarra) .....	81
8.3	Parque eólico Ausejo – Ocón (La Rioja) .....	82
8.4	Parque eólico Tornajos (Almería).....	83
8.5	Parque eólico Vollandín (Navarra) .....	83
Capítulo 9.	Conclusiones y futuras líneas de trabajo .....	88
REFERENCIAS	.....	90

## Índice de Figuras

Figura 1. Capacidad eléctrica renovable para los próximos años (Fuente: IEA, 2021).....	16
Figura 2. Ranking de países según potencia instalada en 2020 (Fuente: AEE, 2021).....	17
Figura 3. Capacidad Energía eólica off shore por países en el año 2020 (Fuente: AEE, 2021).....	17
Figura 4. Potencia instalada en el mundo en 2020 (Fuente: AEE, 2021).....	18
Figura 5. Evolución anual y acumulada de la potencia instalada en España (Fuente: AEE, 2020).....	22
Figura 6. Generación anual de energía por tecnologías (Fuente: AEE, 2020) .	23
Figura 7. Potencia eólica instalada por comunidades autónomas en 2020 (Fuente: AEE).....	24
Figura 8. Distribución de la velocidad de viento en España a 80 metros (Fuente: IDAE, 2011) .....	24
Figura 9. Mapa de parques eólicos en la península ibérica (Fuente: REE, 2021) .....	25
Figura 10. Representación de los principales parámetros para el cálculo de potencia de un aerogenerador (Fuente: Monge Gutiérrez, J.J., 2018).....	31
Figura 11. Representación de los principales tipos de aerogeneradores de eje vertical (Fuente: Tobías Salas, A. y Rubio Jiménez, C. A., 2017).....	32
Figura 12. Disposición de los aerogeneradores sotavento y barlovento (Fuente: Galián, A., 2016).....	33
Figura 13. Partes del aerogenerador o turbina eólica (Fuente: INSST, 2014) ..	34
Figura 14. Elementos principales de la torre de un aerogenerador (Fuente: INSST, 2014).....	34

---

Figura 15. Esquema de la base de la torre de un aerogenerador (Fuente: INSST, 2014).....	35
Figura 16. Esquema de la torre de un aerogenerador (Fuente: Ramos, M., 2016).....	35
Figura 17. Representación gráfica de una pala de aerogenerador (Fuente: Ramos, M., 2016) .....	36
Figura 18. Potencia de los aerogeneradores respecto a la distancia del suelo. (Fuente: WindPower, 2011).....	36
Figura 19. Esquema de funcionamiento del aerogenerador (Fuente: INSST, 2014).....	37
Figura 20. Elementos principales de la góndola de un aerogenerador (Fuente: INSST, 2014).....	38
Figura 21. Representación de los anclajes de los aerogeneradores marinos (Fuente: Energy Professional Symposium, 2018).....	39
Figura 22. Cronograma del desmantelamiento del parque eólico Arriello II (Fuente: MED WIND ENERGY, 2020) .....	46
Figura 23. Distribución de la edad de los aerogeneradores en Europa (Fuente: Wind Europe, 2020).....	46
Figura 24. Evolución de la antigüedad de los parques eólicos en España (Fuente: AEE, 2020).....	48
Figura 25. Mapa de Espacios Naturales Protegidos (Fuente: MITECO, 2021).....	57
Figura 26. Mapa de zonas de la Red Natura 2000 (Fuente: MITECO, 2015) ...	57
Figura 27. Ciclo de vida de una turbina eólica (Fuente: WindEurope, 2020) ....	61
Figura 28. Categorización del mantenimiento según ISO (Fuente: ISO, 2016)	62
Figura 29. Gráfico de relación coste – vida de un aerogenerador (Fuente: Blasco, A., 2021) .....	63
Figura 30. Extensión de vida de un aerogenerador mediante mantenimiento (Fuente: Blasco, A., 2021).....	64

---

Figura 31. Distribución de las partes del aerogenerador más susceptibles de sufrir fallos (Fuente: Cepsa, 2021) .....	66
Figura 32. Pala de aerogenerador reciclada como cubierta para bicicletas en Dinamarca (Fuente: Ovacen, 2021) .....	68
Figura 33. Palas de aerogeneradores en construcción (Fuente: La Razón, 2012).....	70
Figura 34. Estado de una pala de aerogenerador después de su tratamiento (Fuente: Vestas, 2021) .....	72
Figura 35. Evolución del impacto del sector eólico al PIB en España (Fuente: AEE, 2020) .....	76
Figura 36. Impacto en el PIB del sector eólico por áreas (Fuente: KPMG, 2019) .....	77
Figura 37. Estimación del empleo generador por cada tarea de la construcción de un parque eólico terrestre de 50 MW (Fuente: AEE, 2018).....	78
Figura 38. Evolución del empleo directo e indirecto del sector eólico en España (Fuente: AEE, 2020).....	78
Figura 39. Wilpoldsried (Fuente: BBC, 2016).....	80
Figura 40. Plano topográfico de la situación de los aerogeneradores del parque eólico Arbequina (Fuente: Atalaya Generación, 2020).....	81
Figura 41. Plano topográfico de la situación de los aerogeneradores del parque eólico Cascante II (Fuente: Inver Management, 2020).....	82
Figura 42. Plano topográfico de la situación de los aerogeneradores del parque eólico Ausejo - Ocón (Fuente: Ger, 2020).....	82
Figura 43. Plano topográfico de la situación de los aerogeneradores del parque eólico Tornajos (Fuente: SOGEPYME, 2020) .....	83
Figura 44. Plano topográfico de la situación de los aerogeneradores del parque eólico Volandín (Fuente: Enerfin, 2019).....	84
Figura 45. Costes de inversión de un parque eólico (Fuente: AEE, 2021).....	86

## Índice de Tablas

Tabla 1. Comparativa de presupuestos de cinco parques eólicos. (Fuente: elaboración propia, 2022).....	84
Tabla 2. Costes en porcentajes de las categorías fundamentales de los parques eólicos (Fuente: elaboración propia, 2022) .....	85
Tabla 3. Beneficio de cada MW de eólica instalado. (Fuente: elaboración propia, 2022).....	87

# Capítulo 1. Introducción

Durante los últimos meses, la tendencia del precio de los mercados energéticos sigue al alza debido a la escasez de materias primas e imprevistos globales que han ralentizado el transporte y encarecido el coste. Si bien es cierto que la existencia de combustibles fósiles no parece suponer una amenaza inmediata para las próximas generaciones, la presencia de energías renovables se está introduciendo de manera paulatina, pero imparable, en la vida cotidiana y gran cantidad de organismos y entidades públicas ponen la vista en un futuro próximo en el que la sociedad se sustente total o casi totalmente en energías renovables.

El objetivo perseguido a lo largo de este proyecto consiste en el planteamiento y análisis de la vida útil de los parques eólicos con el fin de que los elementos por los que están compuestos los aerogeneradores no supongan un residuo más y tengan capacidad de reutilización dentro o fuera de la industria energética.

En este estudio se plantea de manera conceptual la capacidad de reciclaje de los aerogeneradores, poniendo el foco en mantener y potenciar la energía eólica, un recurso de por sí inagotable, para que ésta suponga un beneficio para la sociedad. Para conseguir este fin, y que la energía generada sea auténticamente verde, no deben quedar lagunas en el proceso productivo que impliquen que parte de los recursos empleados no tengan capacidad de reciclaje o reutilización.

## 1.1 Objetivos del Proyecto

El objetivo principal de este proyecto es analizar la capacidad de alargamiento de vida de un aerogenerador. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos a los que se dará respuesta a lo largo del proyecto:

- Analizar la vida útil de una instalación eólica de tamaño medio terrestre
- Realizar un estudio de rentabilidad de un parque eólico
- Realizar un estudio de impacto ambiental de un parque eólico terrestre e investigar su sostenibilidad (social, medioambiental y económica)
- Estudiar la viabilidad medioambiental del desmantelamiento de un parque eólico terrestre
- Estudiar la capacidad del alargamiento de vida de un aerogenerador

Paula Iria Tabernero Pazos

---

Para ello, en el primer capítulo se encuadra el problema en el contexto global, en el que se presenta el estado actual de la energía eólica y aspectos relacionados con las instalaciones de producción de energía eólica.

En el segundo capítulo se plantea el marco teórico sobre el que se basan las instalaciones eólicas y las necesidades de este tipo de explotaciones energéticas.

En el tercer capítulo se presentan las alternativas del parque eólico una vez ha acabado su vida útil de diseño.

En el cuarto capítulo se presenta un estudio de impacto ambiental resumido, en el que el foco está en cuáles son las consecuencias de la instalación del parque y los procedimientos relativos al terreno que se deben llevar a cabo a la hora de instalar y desmantelar un parque.

En el quinto capítulo se analiza la capacidad de alargamiento de vida que tienen los aerogeneradores y, por consiguiente, los parques eólicos, utilizando el mantenimiento predictivo y los lubricantes.

En el sexto capítulo se presentan las alternativas de reciclaje de los aerogeneradores una vez haya acabado su vida útil y si su destino no es otro parque eólico.

En el séptimo capítulo se presenta el impacto socioeconómico que este tipo de instalaciones pueden suponer sobre la población.

Finalmente, en el capítulo octavo, se resumen los costes de inversión que se deben asumir para la instalación de un parque eólico de tamaño medio, para el cual se ha hecho un estudio de cinco parques de capacidades similares.

Por último, se recogerán las conclusiones a las que se han llegado y se expondrán los retos del sector y algunas posibles líneas futuras de investigación.

## **1.2 Antecedentes**

El modelo actual de consumo de energía lleva a replantear la forma de producción de ésta con modelos que apoyen la economía circular y que reduzcan la cantidad de emisiones de gases nocivos, principalmente de gases de efecto invernadero, para asegurar el bienestar de las próximas generaciones. Es por esto por lo que organismos mundiales ya han tomado medidas para avanzar hacia un futuro próximo que cumpla estas condiciones, y el aprovechamiento de recursos naturales supone una independencia energética de los recursos tradicionales y finitos, trabajando hacia un planeta

más limpio y libre de emisiones perjudiciales para el ser humano y los demás seres vivos.

Se entiende como energía renovable aquella obtenida a partir de un recurso limpio y previsiblemente inagotable que proporciona la naturaleza y su aprovechamiento supone, solamente en España, el aporte total a la red eléctrica de un 46,6% (según fuentes de Red Eléctrica Española, en adelante REE), suponiendo un aumento respecto al 2020 del 9,9% (REE, 2021). Se diferencian los siguientes tipos de energía renovable (Repsol, 2021):

- Solar fotovoltaica, de la cual se puede obtener energía eléctrica a través de paneles solares o energía térmica mediante colectores térmicos que permiten absorber y concentrar calor
- Eólica, que aprovecha masas de aire en movimiento para, a través de un aerogenerador, producir energía eléctrica
- Hidráulica, que transforma la fuerza del agua en movimiento en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica
- Biomasa y biogás: biomasa, que permite generar energía a partir de desechos orgánicos y biogás, que es un gas de origen natural que se obtiene a partir de materia orgánica en estado de descomposición
- Biocombustibles, que se producen gracias a la biomasa
- Energía geotérmica, procedente del aprovechamiento de las capas más superficiales de la tierra
- Marina o undimotriz, que procede de las olas y geomotriz de la subida y bajada de las mareas

Dentro del marco legal, y considerando regulaciones nacionales y europeas como el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (en adelante PNIEC), la Ley 23/2020 o la Ley de Cambio Climático y Transición Energética, en las que se pretende que España tenga una cuota de energía renovable del 35% para 2030 y del 100% para 2050, se refuerza la idea de que las energías renovables serán las que sustenten la mayor parte de la demanda de electricidad para finales de siglo. Cada vez se presentan más problemas referentes a la producción de energía procedente de materias primas como puede ser el carbón, petróleo o elementos radiactivos como el plutonio o uranio mediante fisión atómica, mientras que la fusión atómica todavía es un modelo en desarrollo teórico.

Se parte de la base de que la generación de energías renovables es prácticamente limpia, pero se debe plantear el impacto ambiental alrededor de ellas, desde la fabricación de materiales necesarios para las instalaciones de

este tipo hasta su desmantelamiento una vez la vida útil de los componentes haya acabado, pasando por el transporte, instalación o la viabilidad de terreno para posteriores usos entre otras para poder asegurar el modelo de energía verde. Esto se refleja en la economía circular, tendencia hacia la que evoluciona la actual y pasada economía lineal intentando reducir desperdicios y explotaciones masivas de recursos limitados.

### **1.3 Economía circular**

La economía circular es, según la Fundación de Economía Circular, *“un concepto económico en el que se interrelaciona con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos, se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos”*. El objetivo de la economía circular es desarrollar una estrategia que reduzca la entrada de materiales y la producción de desechos, cerrando así los bucles económicos y de recursos. Este modelo pretende optimizar los stocks y los flujos de materiales, energía y residuos, teniendo como objetivo final que el uso de los recursos sea eficiente. Es por esto, que debe ser una idea planteada desde los responsables de fabricación, que deben plantear los objetos producidos como un bien capaz de ser reciclado para ser posteriormente reutilizado (Escuela de Empresa, 2020).

La economía circular, frente a la economía lineal que consiste en la extracción, producción, consumición y el desecho, propone una serie de retos para las próximas décadas en las que el pilar fundamental sobre el que se basa es la reducción masiva de productos inútiles una vez haya acabado su vida útil (Repsol, 2021). Se pretende que esos productos, ya inútiles para su función original, puedan ser reutilizados o, en su defecto, reciclados para un posterior uso sin tener que recurrir de nuevo a las materias primas limitadas. De esta manera se cierra el primer ciclo de vida de la pieza en cuestión, y se comienza a dar un nuevo uso o se procede al reciclaje para una posterior conformación en forma de otra u otras piezas.

Los siete principios de la economía circular son: rediseño, reducción, reutilización, reparación, renovación, reciclaje y recuperación. Mediante todas estas acciones, se pretende, como objetivo principal, la protección y conservación del medio ambiente a través de acciones como la reducción de emisiones relativas al transporte o la producción de elementos, y además minimizar el consumo de recursos naturales y reducir la generación de residuos.

## 1.4 Energía renovable en España y en el mundo

Actualmente, en un resumen global hecho por la Agencia Internacional de la Energía (IEA), en el que se tienen en consideración todos los tipos de energía renovable en el mundo, se refleja que el año 2021 ha supuesto un nuevo récord en cuanto a instalación de estaciones renovables: se han instalado casi 290 GW, lo que ha supuesto un crecimiento respecto del año 2020 en un 3%. Casi la mitad de esta cantidad ha sido potencia solar fotovoltaica, seguida por eólica e hidroeléctrica (IEA, 2021).

Según el mismo estudio, se prevé que la capacidad de energía renovable pueda llegar a incrementarse en un 60% para el año 2026, con una previsión de instalación de más de 4800 GW (capacidad equivalente a la potencia actual de los combustibles fósiles y nucleares combinados).

En lo que respecta a capacidad por regiones, en el panorama global el líder de instalación de potencia es China, suponiendo un 43%, Europa, Estados Unidos e India. Solamente estos cuatro mercados suponen un 80% de la capacidad de expansión prevista. En la Figura 1 se muestra la previsión de crecimiento de capacidad eléctrica renovable para los próximos años (2021 – 2026) en comparación con el crecimiento entre 2015 y 2020:

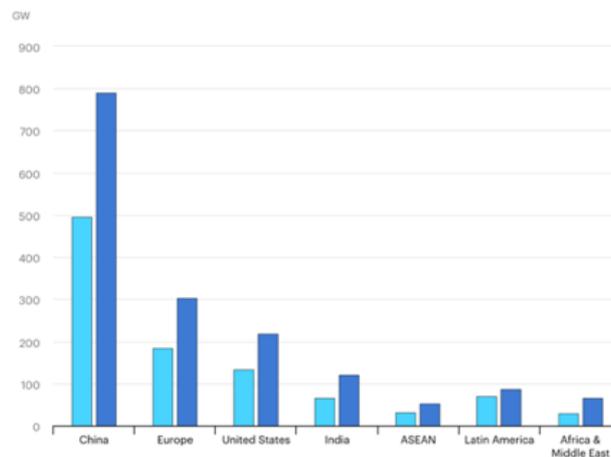


Figura 1. Capacidad eléctrica renovable para los próximos años (Fuente: IEA, 2021)

Centrando el campo en energía eólica, los países con más capacidad instalada terrestre son China (39%), Estados Unidos (17%), Alemania (8%), India (5%) y España (4%). En la Figura 2 se muestra un gráfico con el ranking de países

Paula Iria Tabernero Pazos

con potencia eólica instalada en el año 2020 hecho por Global Wind Energy Council (GWEC) y la Asociación Empresarial Eólica (AEE).

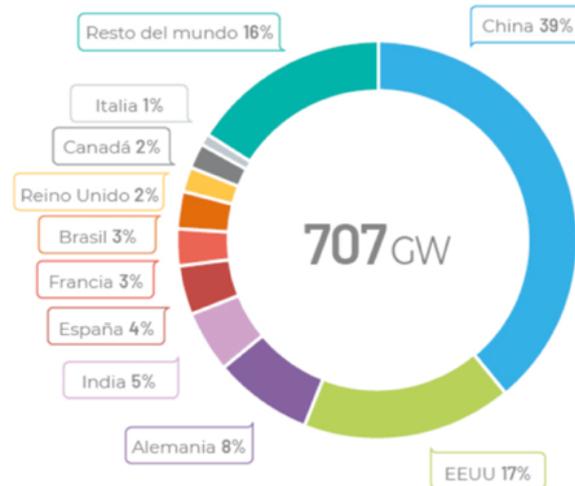


Figura 2. Ranking de países según potencia instalada en 2020 (Fuente: AEE, 2021)

En el caso de energía eólica acumulada off shore (marina), los países que lideran en cuanto a capacidad son: Reino Unido (29%), China (28%), Alemania (22%), Países Bajos (7%) y Bélgica (6%), con una potencia total instalada en 2020 de 35,3GW, tal como se muestra en la Figura 3:

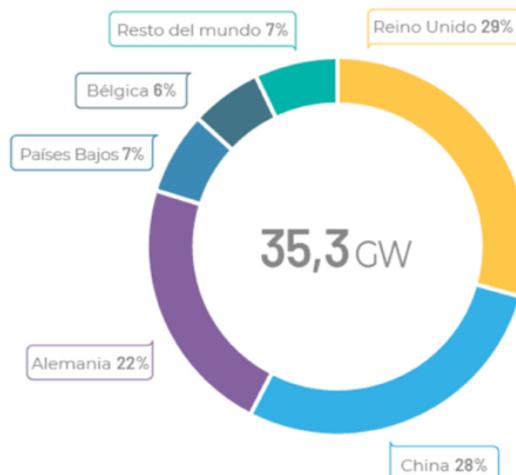


Figura 3. Capacidad Energía eólica off shore por países en el año 2020 (Fuente: AEE, 2021)

Finalmente, en vista general, la potencia eólica instalada, tanto marina como terrestre, en el mundo en 2020 y en MW es la siguiente:

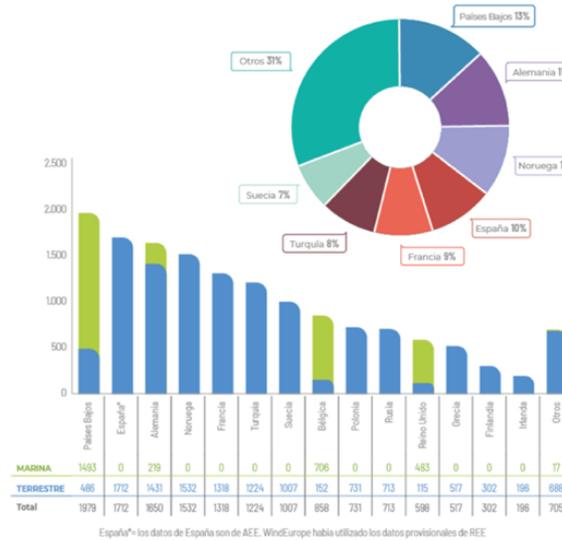


Figura 4. Potencia instalada en el mundo en 2020 (Fuente: AEE, 2021)

### 1.5 Objetivos energéticos a corto plazo

Dentro de los objetivos para 2030, se plantean varios retos. España se ha comprometido, en el anteproyecto de la Ley de Cambio Climático y Transición Energética, a tener una cuota de energía renovable del 35% para el año 2030. Por su parte, el compromiso con la Unión Europea es que este valor sea del 32%, y en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima de 2019, se alza este dato hasta el 42%.

Los retos derivados de estos objetivos legales consisten principalmente en la reducción de emisiones de los gases de efecto invernadero en un 20% respecto de niveles del 1990, mejora de eficiencia energética en un 39,6% (a pesar de que el objetivo legal sea 35%), y la obtención de un aporte del 42% de energía procedente de fuentes renovables (KMPG, 2019).

En el panorama a largo plazo se plantean unos objetivos mucho más ambiciosos, pretendiendo obtener una generación eléctrica al 100% renovable

para 2050 y una reducción igual o superior al 90% de las emisiones de gas de efecto invernadero respecto a 1990 para el año 2040.

En la cumbre de Glasgow, año 2021, se han realizado pactos para reducir un 30% las emisiones de metano, algunos países se han comprometido a acabar con la producción de vehículos de combustión y se ha establecido un pacto para que en 2030 se hayan reducido las emisiones de CO<sub>2</sub> un 45%.

A continuación, se presenta un breve resumen de los siguientes planes o leyes establecidos en España: El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) y la Ley de Cambio Climático y Transición Energética y el Real Decreto Ley 23/2020, con objetivo 2030 (KMPG, 2019):

- El objetivo de uso de energías renovables se pone en un 42% de la energía total demandada para el 2030
- 50 GW de potencia instalada total para 2030, cubriendo un 34% de la aportación total a la red eléctrica
- Repotenciación de entre 10 y 20 GW de eólica
- 42000 MW de capacidad en nuevas máquinas
- Cierre de las centrales de carbón y 4GW de nucleares (se admite mantener los ciclos combinados, que suponen 25 GW de aportación)
- Reducir en 110 Mt las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los dos principales mercados a los que repercute este objetivo son el mercado eléctrico, que deberá reducir sus emisiones hasta un 30% y el transporte, con una reducción del 23% sobre el total
- Inversión en energías renovables de 101.000 millones de euros
- Creación de 180.000 nuevos empleos en el mercado de las energías renovables

## **1.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible**

Dentro de los 17 objetivos de desarrollo sostenible (en adelante ODS) establecidos por las Naciones Unidas (United Nations, 2015) con fecha de consecución prevista en 2030, los líderes participantes en la Cumbre de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de septiembre de 2019 solicitaron acción y resultados de cara a promover que las instituciones logren los Objetivos que se plantearon.

De los 17 objetivos, los que están relacionados con este trabajo (KMPG, 2019) son:

Paula Iria Tabernero Pazos

---

- ODS 3: Salud y bienestar
- ODS 7: Energía asequible y no contaminante
- ODS 9: Industria, innovación e infraestructuras
- ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles
- ODS 12: Producción y consumo responsables
- ODS 13: Acción por el clima

Por otra parte, los que se pueden ver afectados, y cuyo foco debería centrarse en garantizar que las infraestructuras creadas por y para el ser humano impacten el mínimo posible sobre ellos son:

- ODS 14: Vida submarina. Alrededor del 5% del PIB mundial proviene del mercado creado por los recursos marinos, y se estima que más de 3 mil millones de personas dependen de ellos. En las metas de este objetivo, para 2030, destaca mejorar la conservación y el uso sostenible de los océanos. Para 2025 se pretende prevenir y reducir la contaminación marina de todo tipo.
- ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres. Entre 2010 y 2015, se perdieron 3,3 millones de hectáreas de áreas forestales, zonas que albergan a más del 80% de las especies terrestres de animales, plantas e insectos. Dentro de los objetivos para el 2030 se pretende velar por la conservación de los ecosistemas montañosos y su diversidad y procurar una degradación neutra del suelo (United Nations, 2015).

Según el escenario sostenible planteado en base a la recopilación de información de los escenarios de transición energética “Sustainable Development Scenario”, procedente de EIA, “REmapCase”, de IRENA, y “Escenario Sky”, de Shell, dentro de las acciones previstas para ayudar a conseguir los Objetivos de Desarrollo Sostenible se espera que el consumo de energía final de fuentes renovables llegue a un 22%, dentro de los beneficios económicos se prevé que las reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> conseguidos con la energía eólica sean alrededor de 386 000 millones de dólares, el ahorro de agua en 2030 podría llegar a ahorrar 16 000 millones de metros cúbicos, y en cuanto a empleabilidad, el sector eólico podría llegar a disponer de hasta 4,1 millones de personas, incluyendo puestos de empleo directos e indirectos (KMPG, 2019).

En cuanto a “Acción por el clima”, objetivo número 13, solamente en España, se espera que para 2030 la energía eólica evite la emisión de 10,75 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, un ahorro de 142 millones de metros cúbicos de agua, ayudando al objetivo número 6, “Agua limpia y saneamiento”, y aporte un 0,2%

de ahorro en costes sanitarios por la energía renovable (con una previsión de reducción de emisiones de SO<sub>2</sub> del 44% y de NO<sub>x</sub> del 29%).

### **1.7 La energía eólica y la red eléctrica**

Según la Asociación Empresarial Eólica (AEE), los tres principales factores de los que depende el coste final de la factura eléctrica son los costes regulados (que incluyen el transporte, la distribución, el pago de deuda y los intereses del déficit de tarifa, el incentivo que se paga a las grandes industrias por reducir su consumo eléctrico, los pagos por capacidad a tecnologías convencionales, los incentivos a las renovables y la cogeneración, y los sobrecostes por la generación eléctrica en las islas), el coste de generación eléctrica y los impuestos. Supusieron, en 2020 y en porcentaje, un 52%, 26% y 22% del total respectivamente (AEE, 2021).

Dentro de las energías, las renovables tienen un coste cero de materia prima como tal (radiación solar, corriente marina o velocidad del viento), y es por esto por lo que los productores de renovables pueden ofertar su energía a un coste menor que los productores de energía proveniente de energía fósil. Para hacer el cálculo del precio al que pueden vender su energía, las empresas plantean el LCOE (modelo de coste normalizado de la electricidad, siglas provenientes de su traducción al inglés “levelized cost of energy”), que representa lo que cuesta un sistema en relación con la vida útil prevista de una central de energía. De esta forma, cuanto mayor sea la cantidad de producción de energía renovable o, en el caso objeto de estudio, eólica, menor pagarán los consumidores finales.

Un estudio hecho por AEE (Arenal, Ceña, Morante, Romagosa, & Willstedt, 2021) afirma que la eólica generó un ahorro neto (descontando los incentivos referentes a los costes regulados), a los consumidores de 71 millones de euros en 2020. Según el mismo estudio, durante el año 2021, la demanda de energía fue cubierta en un 23% por energía eólica, siendo la primera fuente de generación de España.

El coste de la energía se fija en un mercado competitivo en el que las diversas empresas productoras ofertan de manera diaria la electricidad para cada hora del día siguiente. De manera recurrente, se organizan subastas en las que se presenta una cantidad de potencia eólica a instalar, y son las partes interesadas quienes deben solicitarlo, para que posteriormente se les asigne la explotación (MITECO, 2021).

Paula Iria Tabernero Pazos

Con el fin de reducir la factura eléctrica y avanzar hacia el cumplimiento del PNIEC, solamente durante el año 2021 se han subastado 998 MW en enero y 2258 MW en octubre de potencia eólica que deberán ser puestos en operación antes de octubre de 2024 según fuentes de la Asociación Empresarial Eólica.

### 1.8 Energía eólica en la España peninsular

La producción de energía eólica española durante el año 2020 ha sido de 53 645 GWh, contando con una potencia total instalada de 274 46MW, según datos obtenidos por AEE y utilizando el criterio de Acta de Puesta en Servicio (Arenal , Ceña, Morante, Romagosa, & Willstedt, 2021), y con una cobertura de la demanda de 21,9%. Para ponerlo en contexto global, la energía eólica total instalada en el mundo es de 743 GW.

De las 50 provincias españolas, 47 de ellas cuentan con energía eólica y 20 de ellas generan más de 1 TWh (que es el equivalente a cubrir el consumo medio de 285 mil hogares) gracias a la energía proveniente del viento. Dentro del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), uno de los objetivos consiste en tener instalada una potencia de 2,2 GW anuales de potencia eólica para el año 2030. Solo durante el año 2020, se ha instalado un total de 1,720 GW (Arenal , Ceña, Morante, Romagosa, & Willstedt, 2021)

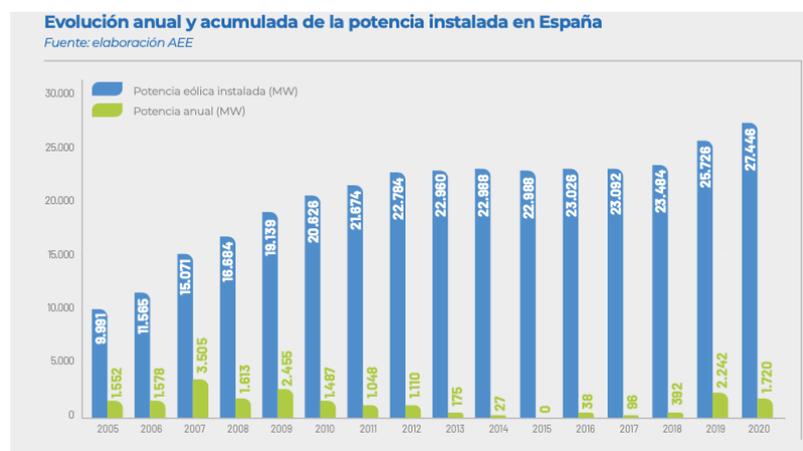


Figura 5. Evolución anual y acumulada de la potencia instalada en España (Fuente: AEE, 2020)

En la Figura 5, en las barras verticales azules se muestra la potencia eólica acumulada instalada, y en verde la nueva potencia anual, en MW.

Durante el año 2020, cerca de la mitad de la energía consumida por la población española (44,9%), tuvo su origen en energías renovables, entre las que destacan la eólica y la hidráulica.

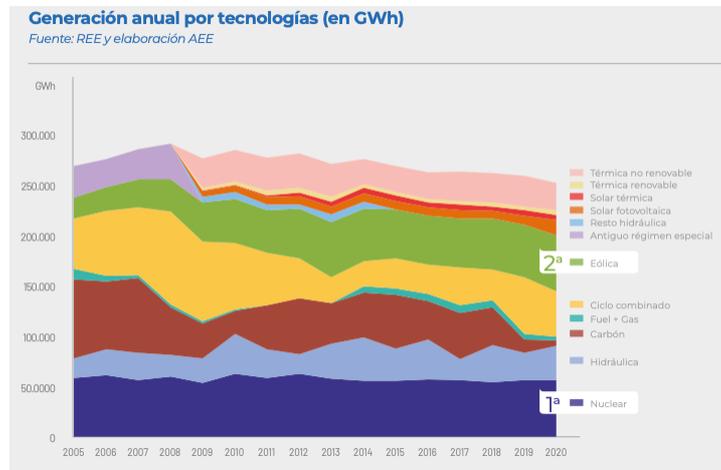


Figura 6. Generación anual de energía por tecnologías (Fuente: AEE, 2020)

Como se aprecia en la Figura 6, la segunda fuente de energía de todas las consumidas en España es la eólica, solo después de la nuclear, y obteniendo cantidades similares a las producidas en años anteriores mediante carbón.

La cobertura de la demanda de energía mediante eólica, durante el año 2020, ha llegado a suponer un 87,7% en la Comunidad Autónoma de Castilla y León, y 70,2% en Castilla La Mancha. Destacan también comunidades como La Rioja o Aragón, con unos porcentajes de 57,2% y 49,6% respectivamente, y en los últimos puestos del ranking de demanda de eólica se sitúan Baleares, Ceuta y Melilla y Madrid, con un 0,1%, 0% y 0% respectivamente.

En la Figura 7 se muestra una tabla con la potencia instalada por comunidades autónomas españolas en el año 2020, siendo las tres primeras con mayor potencia eólica instalada Castilla y León, Castilla La Mancha y Galicia:

**Potencia eólica instalada por comunidades autónomas 2020**  
(En MW y porcentaje de cuota de mercado)

Fuente: elaboración AEE

CCAA	Potencia eólica Instalada en 2020 (MW)	Potencia Acumulada a Cierre de 2020 (MW)	Cuota de Mercado Sobre el Acumulado (%)	Nº de Parques Eólicos
Castilla y León	216	6.300	23,0%	267
Castilla La Mancha	65	3.886	14,2%	148
Galicia	24	3.829	14,0%	179
Andalucía	24	3.478	12,7%	162
Aragón	1.051	4.159	15,2%	168
Cataluña	0	1.271	4,6%	47
Comunidad Valenciana	50	1.239	4,5%	39
Navarra	262	1.303	4,7%	58
Asturias	0	590	2,1%	23
La Rioja	0	447	1,6%	14
Islas Canarias	29	450	1,6%	89
Murcia	0	262	1,0%	14
País Vasco	0	153	0,6%	7
Extremadura	0	39	0,1%	1
Cantabria	0	35	0,1%	3
Baleares	0	4	0,0%	46
<b>TOTAL</b>	<b>1.720</b>	<b>27.446</b>		<b>1.265</b>

Figura 7. Potencia eólica instalada por comunidades autónomas en 2020 (Fuente: AEE)

La presencia de explotaciones eólicas está directamente relacionada con la presencia de vientos, y en la península, la presencia de vientos hace óptima la instalación en áreas del norte y noroeste peninsular y este. En la Figura 8 se muestra la distribución de los vientos en la península a 80 metros del suelo, que es aproximadamente la altura del buje de los aerogeneradores que están instalados en la actualidad, lo que nos permitirá relacionarlo con la presencia de parques eólicos.

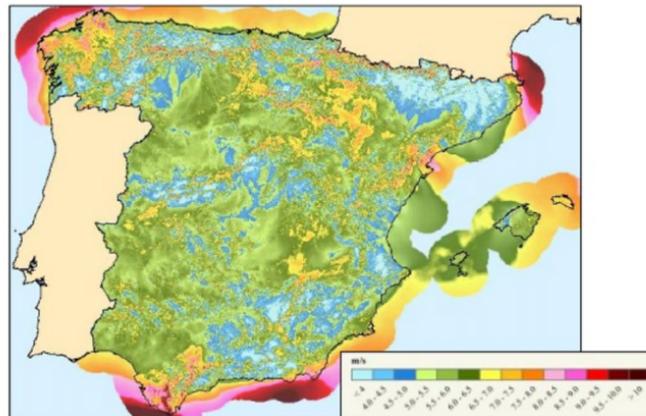


Figura 8. Distribución de la velocidad de viento en España a 80 metros (Fuente: IDAE, 2011)

En la Figura 9 se muestra un mapa con la presencia de parques eólicos en la península ibérica, hecho por la Red Eléctrica de España en colaboración con ESIOS (Sistema de Información del Operador del Sistema), y actualizado a fecha de 15 de septiembre del 2021. El código de colores se plantea de

manera que cuanto más oscuro es el punto que representa al parque eólico, mayor capacidad (en MW) tiene la instalación.

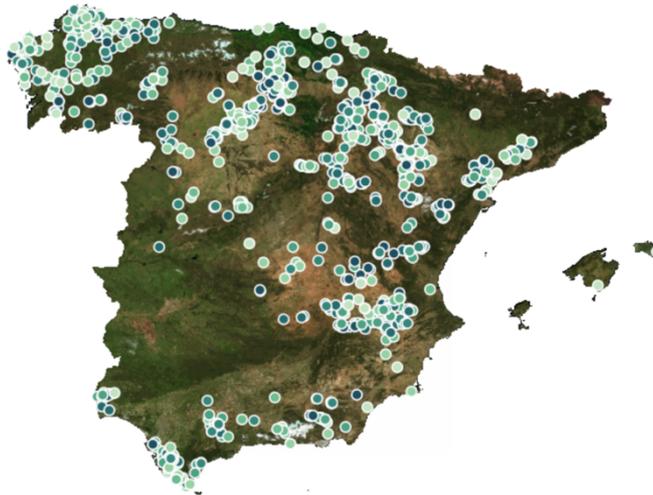


Figura 9. Mapa de parques eólicos en la península ibérica (Fuente: REE, 2021)

### 1.9 Normativa estatal y autonómica

Dentro de la normativa establecida dentro de España, la legislación relativa a energía eléctrica se divide en las competencias del Estado y las de las Comunidades Autónomas. A la hora de hacer una instalación eléctrica se debe tener en cuenta la legislación nacional, y en función del lugar del emplazamiento, la normativa competente a la Comunidad Autónoma donde se vaya a instalar.

Las competencias relativas al Estado, según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO, 2021), dentro del Código de la Energía Eléctrica y publicado en el BOE a 23 de diciembre de 2021, se dividen en once grupos:

- Legislación estatal general, en el que se recogen las medidas generales para garantizar el suministro, medidas para impulsar la economía, medidas fiscales para la sostenibilidad ecológica, protección social y mejora de gestión, correcciones de las desviaciones por desajustes entre los costes e ingresos del sector eléctrico...
- Aspectos generales de las actividades, pagos por capacidad y peajes de acceso, en el que se incluyen las regulaciones de costes energéticos, costes regulados, establecimiento de tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de la energía eléctrica...

- Mercado de producción de energía eléctrica en el sistema peninsular, en el que se incluye la organización y regulación del mercado de producción de energía eléctrica, regulación de los efectos de entrada en funcionamiento entre el sistema eléctrico peninsular y balear, regulación del funcionamiento del mercado mayorista de electricidad y gestión de operaciones...
- Producción de energía eléctrica en los sistemas no peninsulares, en el que se recoge principalmente la regulación de actividad de producción de energía en los territorios no peninsulares, así como el precio y logística a emplear a efectos de precio de combustibles.
- Energías renovables, cogeneración y residuos, que regula la conexión a la red de instalaciones de producción de energía, los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía, cogeneración y residuos, las disposiciones necesarias para instrumentar un sistema de ayudas a la inversión en instalaciones de producción de energía a partir de fuentes renovables...
- Transporte de energía eléctrica y operación del sistema, en el que se regulan las conexiones a las redes de transporte de energía, calendario de subastas para la asignación del servicio, metodología de retribución de operadores del sistema eléctrico...
- Distribución de energía eléctrica, en la que se revisan las tarifas eléctricas, se establece la metodología para el cálculo de la retribución de actividad de distribución de energía eléctrica, metodología de cálculo de tasa de retribución financiera por las actividades de transporte y distribución de energía eléctrica...
- Comercialización y suministro, en la que se regulan las condiciones de los contratos de adquisición de energía y acceso a las redes de baja tensión, la metodología de cálculo de los cargos del sistema eléctrico...
- Regulación de actividades eléctricas, autorización de instalaciones y contratación del suministro, en la que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica, condiciones básicas de los contratos de adquisición de energía y disposiciones relativas al sector eléctrico sobre el libre acceso a las actividades de servicios y su ejercicio.
- Intercambios nacionales, en la que se establecen las metodologías que regulan el funcionamiento del mercado mayorista de electricidad y gestión de la operación del sistema

Paula Iria Tabernero Pazos

---

- Eficiencia energética, en el que se incluye la certificación de la eficiencia energética de los edificios, el fomento de los biocarburantes, la contabilización de consumos individuales en instalaciones térmicas de edificios, obligaciones de aportación al Fondo Nacional de Eficiencia Energética...

Por otra parte, los elementos que se deben incluir en el BOE para cada comunidad autónoma son los planes de aprovechamiento eólico, incluyendo los criterios de planificación y planes sectoriales, los Fondos de Compensación Ambiental, en el que se detalle la financiación, destino y gestión del mismo, el procedimiento de autorización administrativa de las instalaciones de parques, la transmisión de instalaciones y modificación de parques eólicos el registro eólico dentro de la comunidad, la expropiación y servidumbres, en el que se debe incluir la declaración de utilidad pública y la concurrencia de utilidades o interés público y trámite y declaración de compatibilidad o prevalencia. (*Lexnavarra*. s.f.), (Boletín Oficial del Estado, 2021), (BOE.es - BOE-A-2011-7842 Ley 9/2011, de 21 de marzo, por la que se crean el canon eólico y el Fondo para el Desarrollo Tecnológico de las Energías Renovables y el Uso Racional de la Energía en Castilla-La Mancha, 2011).

## Capítulo 2. Marco teórico

El viento es un recurso que lleva utilizándose a favor de los seres humanos desde hace miles de años, para el transporte desde el año 5000 – 4000 a.C. mediante la navegación, en la que su uso principal era la propulsión de barcos, con épocas en las que su uso se intensificó, y posteriormente, en la época del 1700 a.C., en el que se utilizaba principalmente para la molienda de grano y en la Edad Media en Europa. Era un recurso fundamental para ayudar a moler grano, extraer aceites de semillas o drenar terrenos. Más adelante, en el siglo XVIII, aparece en Estados Unidos el molino multipala, que se convierte en un éxito de ventas y permitía bombear agua de manera revolucionaria en el momento. Después, durante el siglo XIX, se presenta en Dinamarca la turbina Lacourt, que marcará un precedente y será el antecesor de las turbinas actuales (Monge, J., 2018).

Durante el siglo XX, en un período marcado por las guerras, hay un gran aumento de energía eléctrica ya que el desarrollo de la tecnología es impulsado por la industria aeronáutica y los mercados de crudo no están en pleno auge. Fue después de la Segunda Guerra Mundial, cuando se produce un declive en el mercado debido a la impulsión que tiene la industria del petróleo. Pasado este período, y a principios del siglo XXI es cuando se recrea una expansión en países desarrollados con la finalidad de utilizar este recurso natural para la obtención de energía limpia para la sociedad, influida, además, por la crisis del petróleo.

En España, el primer aerogenerador instalado fue el “Mazinger”, una turbina experimental de diseño y construcción nacional de 100 kW de potencia, con un rotor de 20 metros de diámetro y una torre metálica de 20 metros de altura.

Por su parte, el primer parque eólico conectado a la red eléctrica española fue en el año 1984 en Gerona, amparado por la Ley 80/82 sobre Conservación de la Energía, y que, sin mucho éxito, fue desmontado pocos años después debido a las exigencias en las condiciones climáticas y problemas técnicos.

No obstante, poco a poco la energía eólica en España fue cobrando importancia, y en los años 1986 y 1989 se presentaron los Planes de Energías Renovables, que finalmente dieron el impulso necesario para potenciar este desarrollo (IDAE, 2006).

## 2.1 Conceptos generales

Se define viento como “masa de aire en movimiento por diferente temperatura en distintas zonas de la superficie terrestre”, que viene causado por diferencias de presión y causa la circulación del aire de zonas de mayor a menor presión (Monge, J., 2018).

Se puede dividir la circulación atmosférica, que es un fenómeno impulsado y sostenido por el desigual calentamiento entre Ecuador y los polos, (*Tema 7. Circulación General Atmosférica*, s.f.) en dos grupos: circulación general, término en el que se engloba lo referente a temperatura, presión humedad... comúnmente referido como grandes sistemas del viento permanentes de la troposfera y estratosfera (Kats, A. L., 1970); y circulación a escala local, que es la que constituye pequeñas modificaciones de densidad y presión, cuyo resultado es la aparición de circulaciones que son más intensas según los regímenes de vientos generales son más débiles (Vasco, G. J. E., s.f.).

Estudiando la circulación general, las causas de los vientos son:

- La mayor insolación en torno al Ecuador que en los Polos
- Aceleración de Coriolis (que causa la desviación de corrientes hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur)
- La modificación de corrientes por interacción con continentes (algo que es más acusado en el hemisferio norte)
- Perturbaciones atmosféricas

Por su parte, en la circulación a escala local, los vientos son causados por:

- La influencia de océanos y corrientes marinas
- Las diferencias de temperatura a escala local
- La modificación de corrientes por interacción con continentes (algo que es más acusado en el hemisferio norte)
- Perturbaciones atmosféricas

Dentro de la categoría de vientos a escala local, se diferencian dos tipos de viento que son: los vientos de circulación secundaria (huracanes, tifones, monzones...) y los vientos de circulación terciaria (brisas, viento föhn, tormentas, tornados...). A la hora de cuantificar el viento, y realizar predicciones sobre él, el análisis es complejo ya que se trata de un recurso variable y de carácter bastante aleatorio, y es por esto por lo que hay problemas importantes con porcentajes elevados de energía eléctrica de

procedencia eólica en determinados espacios temporales ya que se desconoce cuánta cantidad de energía se va a poder generar y resulta difícil planificarlo en el mercado eléctrico. Esta es la razón de que se hayan desarrollado modelos de predicción específicos para este campo de la técnica.

Cuando se plantea la instalación de un parque eólico, es importante hacer un estudio previo de la zona y la densidad de viento. Actualmente, en España, el Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (BSC – CNS (Barcelona Supercomputing Center - Centro Nacional de Supercomputación)) e Iberdrola, están desarrollando en conjunto, y con la participación del Centro Nacional de Energías Renovables de España (Cener), una iniciativa llamada Proyecto Sedar (Simulación Eólica De Alta Resolución), cuyo objetivo es, según Iberdrola, *“desarrollar un nuevo modelo informático que mejorará la estimación de la producción de energía eléctrica en los parques eólicos – terrestres y marinos – antes de su construcción”*. Iberdrola y el BSC están utilizando para desarrollar este proyecto el MareNostrum, que es el superordenador más potente de España y, gracias a él, *“se diseñarán nuevas instalaciones eólicas que se pongan en marcha con más garantías, ya que proporcionará ubicaciones más idóneas para instalar los aerogeneradores y reducirá la incertidumbre a la hora de invertir en este tipo de estudios; esta fase del proyecto se lleva a cabo con el software Alya Green, que se podrá aplicar en los nuevos parques eólicos terrestres y marinos”*. El objetivo de este proyecto es poder prever las localizaciones idóneas para instalar parques eólicos maximizando los beneficios (ER, 2013).

Para aprovechar la energía proveniente del viento se utilizan turbinas eólicas, pero también tienen limitaciones, pues no todo el aire que reciben las turbinas se puede convertir en energía. Según la ley de Betz, *“solo puede convertirse, como máximo, un 16/27 (59%) de la energía cinética del viento en energía mecánica utilizando un aerogenerador”*. La potencia del aerogenerador se calcula según la siguiente fórmula, cuyos parámetros son función tanto del aire como del propio aerogenerador.

$$P_{aerogenerador} = C_p * \rho_{aire} * A * V^3$$

La potencia del aerogenerador será, por tanto, función del coeficiente de potencia del aerogenerador (que a su vez depende de la velocidad del viento, la velocidad de rotación, el tipo de turbina...), el área de barrido (ambas dependientes del aerogenerador); la densidad del aire, y el cubo del volumen de barrido, (ambas dependientes del viento).

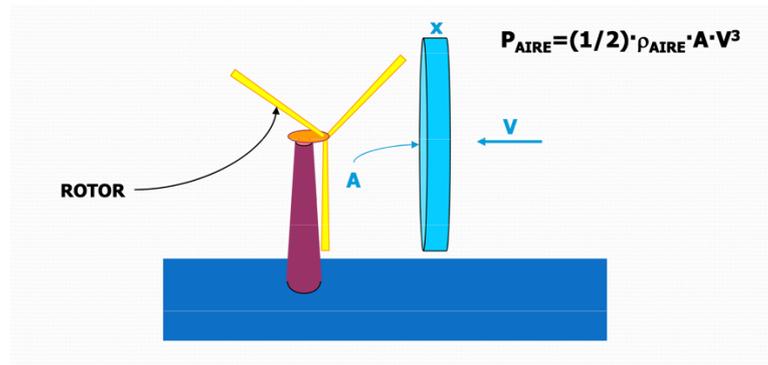


Figura 10. Representación de los principales parámetros para el cálculo de potencia de un aerogenerador (Fuente: Monge Gutiérrez, J.J., 2018)

El aerogenerador es el dispositivo en el que se transforma la energía cinética en energía eléctrica, y el proceso es el siguiente: la turbina eólica recibe viento, caracterizado como energía cinética y con un coeficiente de potencia, que es función de la velocidad, velocidad de rotación de la turbina, área de barrido... A continuación, esta energía va a la caja de multiplicación o transmisión mediante cableado interno de la turbina (que tendrá su coeficiente de rendimiento), y finalmente pasa al generador eléctrico (con su correspondiente coeficiente de rendimiento). El rendimiento total de la turbina es función de los dos rendimientos y del coeficiente de potencia de la turbina tal que:

$$\eta_{turbina} = C_p(turbina) * \eta_{caja\ de\ transmisión} * \eta_{generador\ eléctrico}$$

## 2.2 Tipos de aerogeneradores

A lo largo de los años, se han ido perfeccionando los aerogeneradores para que tengan la mayor eficacia ejecutable, con un diseño que permita un montaje, desmontaje, mantenimiento asumible, y buen rendimiento. En la actualidad, los principales tipos de aerogeneradores son los de eje horizontal y los de eje vertical.

Los aerogeneradores de eje vertical, en los que la dirección del viento es perpendicular al eje de giro del rotor, entre los que destacan la turbina Savonius, diseñada para regiones con viento variable y la turbina Darrieus, que permite la instalación con dos o tres palas.

Son aerogeneradores apropiados para regiones de viento variable, y en los que el generador, multiplicador, y los elementos necesarios aparte del transporte

Paula Iria Tabernero Pazos

necesario de energía están situados en el suelo. Además, no tienen ni necesitan mecanismo de orientación, pero reciben velocidades de viento bajas en la parte inferior del rotor debido al rozamiento con el aire. Tienen una baja eficacia, es necesario la presencia de cables tensores y, por ejemplo, turbina Darrieus no tiene arranque automático, lo que supondría que por cada fallo con parada que hubiera o cada espacio temporal en el que no hubiera suficiente viento como para mantenerlo en movimiento, una pérdida en términos económicos importante. Además, la ocupación del terreno de este tipo de aerogeneradores es grande y producen un impacto visual importante (Monge, J., 2018).

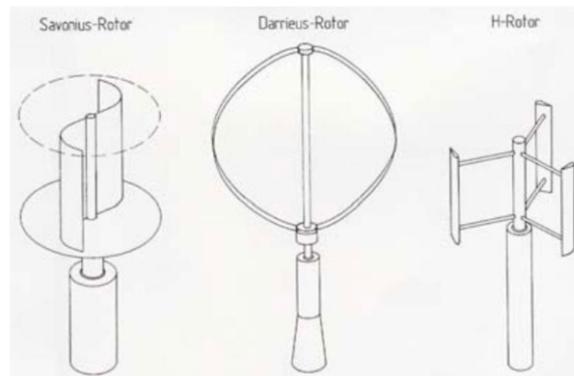


Figura 11. Representación de los principales tipos de aerogeneradores de eje vertical (Fuente: Tobías Salas, A. y Rubio Jiménez, C. A., 2017)

Los aerogeneradores de eje horizontal, en los que la dirección del viento es paralelo al eje del rotor. Son los aerogeneradores más habituales y, y están presentes en la vida cotidiana desde hace cientos de años, como por ejemplo el multipala americano, usado para bombear agua, o los molinos de La Mancha. Dentro de esta categoría se encuentra el molino danés, que es el más utilizado a nivel comercial. Se distinguen a su vez dos tipos: los sotavento y los barlovento. Los sotavento no tienen mecanismo de orientación, se generan turbulencias por la torre y la góndola y llegan al rotor, que hace girar el mecanismo. El viento viene de la parte posterior. En los barlovento sí es necesario un mecanismo de orientación, y el rotor se ve poco afectado por las turbulencias provocadas por la torre y la góndola. Son los más utilizados actualmente, y en este caso, el viento proviene de la parte frontal del aerogenerador.

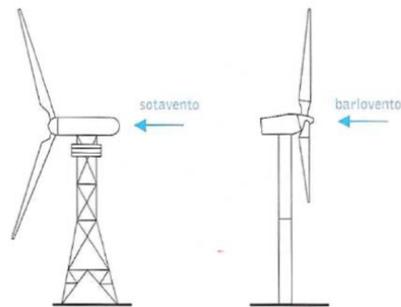


Figura 12. Disposición de los aerogeneradores sotavento y barlovento (Fuente: Galián, A., 2016)

### 2.3 Partes de los aerogeneradores

Los tres principales sistemas de los aerogeneradores son: el rotor, la multiplicadora (o caja de engranajes), y el generador eléctrico. El rotor, formado principalmente por las palas y el buje, y encargado de captar la energía del viento, convierte la energía cinética del viento en energía mecánica que se transmite al eje lento (el posterior). Este eje, conecta el buje a la multiplicadora. En la parte interna del eje están los sistemas hidráulico y eléctrico que controlan el movimiento de las palas. A continuación está multiplicadora, cuyo objetivo es conseguir que el eje de salida gire a más velocidad que el eje de entrada y así conseguir una mayor velocidad de giro (de 50 a 80 veces mayor).

A la salida del eje rápido, en el generador, se transforma la energía mecánica en eléctrica. En el generador también están presentes unos conductores eléctricos que distribuyen la energía hacia la base de la torre, donde normalmente está el transformador interno, que transforma energía de baja tensión (entre 480 V y 690 V) a alta tensión (20000 o 30000 V), para poder distribuirla para su consumo (Cobreiro, P. Jiménez, N., 2014).

Además, en los aerogeneradores de tipo danés, se diferencian otros elementos principales como los sensores, la góndola o la torre.



Figura 13. Partes del aerogenerador o turbina eólica (Fuente: INSST, 2014)

La **torre**, principalmente hecha de acero en forma de torre tubular troncocónica, aunque en ocasiones puede estar hecha de hormigón o celosía, es la parte que mantiene al aerogenerador en pie. Es una estructura hueca en la que se instalan diferentes sistemas en su interior. Debe incluir una escalera para poder llegar a la góndola del aerogenerador, y en algunos modelos se instala un ascensor. Es posible que utilicen el mismo espacio las escaleras y el ascensor. En la base de la torre se encuentra el transformador. La torre está dividida por plataformas intermedias, en las que se encuentran los puntos de unión del elemento completo.

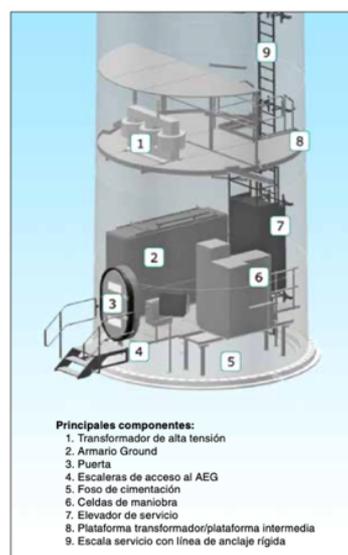


Figura 14. Elementos principales de la torre de un aerogenerador (Fuente: INSST, 2014)

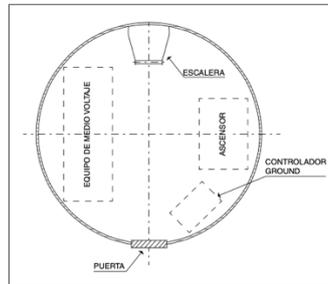


Figura 15. Esquema de la base de la torre de un aerogenerador (Fuente: INSST, 2014)

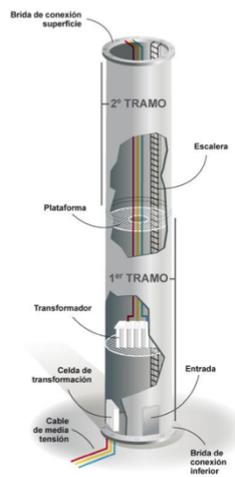


Figura 16. Esquema de la torre de un aerogenerador (Fuente: Ramos, M., 2016)

Las **palas** son los elementos encargados de captar la energía del viento. Su diseño es aerodinámico para tratar de maximizar la energía captada. Están compuestas principalmente por fibra de vidrio en matriz de resinas epoxi o poliéster, aunque también se pueden hacer de acero o aluminio. Es fundamental que las palas tengan elevada resistencia y rigidez, así como que sean resistentes a la corrosión, combinándolo con el menor peso y coste posibles.

El tamaño de las palas es directamente proporcional a la potencia (que está relacionada con la superficie de barrido) y a la altura (al separar las palas del suelo, hay menos rozamiento con éste y los vientos tienen velocidades mayores). Están unidas al rodamiento del buje mediante una corona de pernos que permite el eje longitudinal de la misma, y su longitud varía desde 45 m y 66 metros para instalaciones terrestres actualmente (Cobreiro, P. Jiménez, N., 2014).

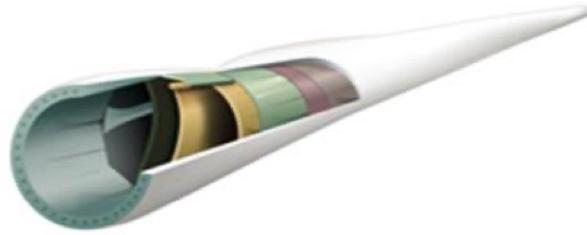


Figura 17. Representación gráfica de una pala de aerogenerador (Fuente: Ramos, M., 2016)

En la Figura 18 se muestra la potencia que pueden llegar a alcanzar los aerogeneradores en función de la altura respecto del suelo a la que estén instalados:

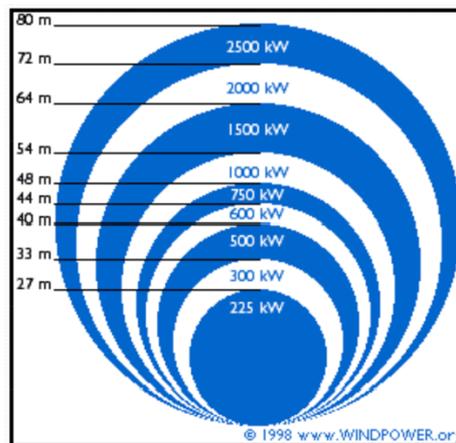


Figura 18. Potencia de los aerogeneradores respecto a la distancia del suelo. (Fuente: WindPower, 2011)

El otro elemento que constituye el rotor es el **buje**, que es el elemento que conecta las palas al eje principal, y es el encargado de transmitir el par a la caja de multiplicación. En el caso de los rotores monopala y bipala se utiliza un buje oscilante, y en el caso de las tripala un buje rígido.

El **rotor**, formado principalmente por las palas y el buje, y encargado de captar la energía del viento, convierte la energía cinética del viento en energía mecánica que se transmite al eje lento, que se sitúa en la parte posterior del aerogenerador. Este eje conecta el buje a la multiplicadora. En la parte interna del eje están los sistemas hidráulico y eléctrico que controlan el movimiento de las palas. A continuación, en multiplicadora se pretende conseguir que el eje de salida gire a más velocidad que el eje de entrada y así conseguir una mayor velocidad de giro.

En la Figura 19 se presenta un esquema de los principales elementos y su situación dentro del aerogenerador:

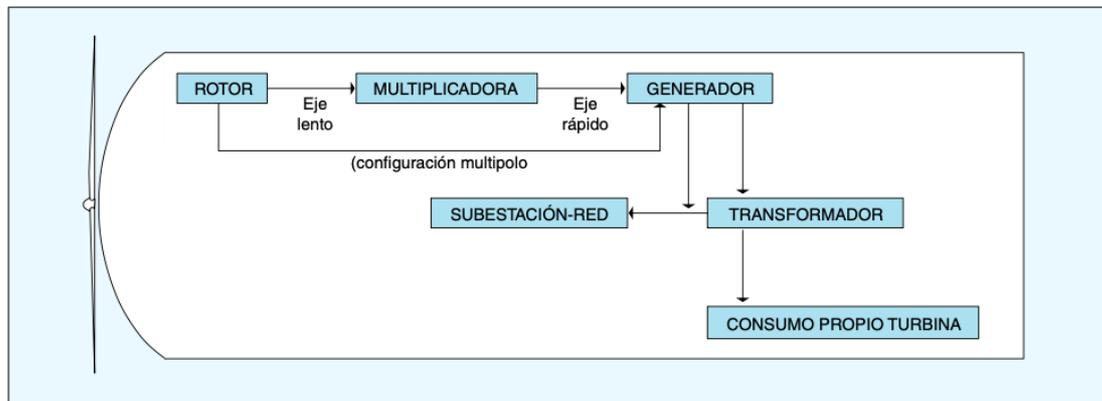


Figura 19. Esquema de funcionamiento del aerogenerador (Fuente: INSST, 2014)

Para que la turbina comience a girar, se deberán tener en cuenta la velocidad de arranque, la velocidad nominal, que es en la que la potencia obtenida del viento se estabiliza (Munguía, I., 2009), y la velocidad de corte.

La turbina comenzará a funcionar, desactivando los sistemas de freno, cuando la velocidad supere la velocidad de arranque, de 3 metros/segundo (por eficiencia) y siempre que sea inferior a la velocidad de corte, 25 metros/segundo, (por seguridad) en turbinas convencionales. En caso de superar o no llegar a ese umbral, se activan los mecanismos de freno y se para. Es fundamental conocer cada turbina en función de las especificaciones del fabricante para saber los límites sobre los que es peligroso trabajar con ellas.

La **góndola o nacelle** es el elemento que contiene la caja de multiplicación, los ejes, el generador eléctrico, los frenos mecánicos... y dispone de elementos diseñados para medir las características del viento mediante elementos como la veleta y el anemómetro. Los elementos principales dentro de la góndola son la multiplicadora y el generador. El eje principal es el encargado de transmitir el par del buje a la caja de multiplicación. Por su parte, el eje secundario es el conector entre la multiplicadora y el generador. Los principales elementos por los que está formada son:

- La **caja de multiplicación** tiene como objetivo aumentar la velocidad de giro del eje principal hasta alcanzar la velocidad de giro necesaria para el generador

Paula Iria Tabernero Pazos

---

eléctrico en el eje de alta velocidad (que conecta la caja de cambios con el generador eléctrico asíncrono), y es la parte del sistema que más averías sufre.

- Los **frenos** permiten el paro de la turbina y se diferencian dos tipos: frenos aerodinámicos, que frenan el rotor haciendo que entre en pérdida, y los frenos mecánicos que mantienen la turbina parada.
- El **mecanismo de orientación** es un motor que mantiene el plano del rotor perpendicular a la dirección del viento para que tenga orientación barlovento (en este tipo de turbinas).
- El **control electrónico** está formado por una serie de sensores que deben supervisar condiciones de mantenimiento del aerogenerador. Son sistemas que están completamente automatizados, y mediante este control se monitoriza la velocidad y dirección del viento, así como parámetros relativos al aerogenerador, como son la velocidad de giro del rotor, la potencia generada, el ángulo de paso... Además, es el elemento responsable de detectar averías, activar los frenos y mandar una señal a la central responsable de su funcionamiento.

En la Figura 20 se muestran los elementos principales de la góndola:

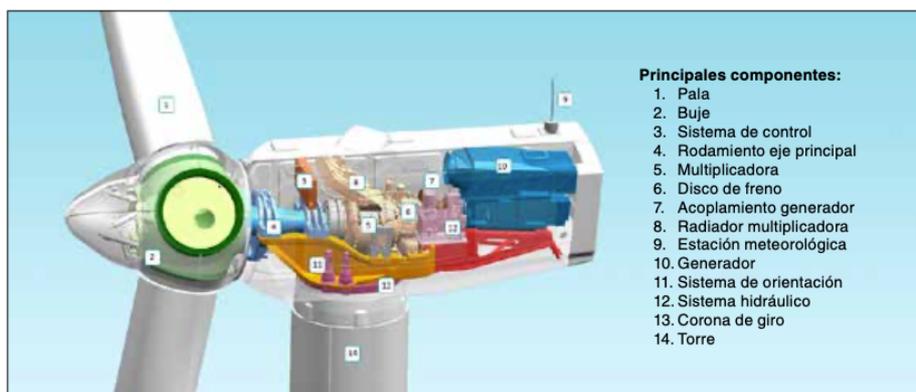


Figura 20. Elementos principales de la góndola de un aerogenerador (Fuente: INSST, 2014)

## 2.4 Cimentaciones

En cuanto a las cimentaciones, en las instalaciones en tierra (on – shore), están hechas de hormigón armado (hormigón y acero). En las instalaciones marinas (off – shore), se distinguen tres tipos principales:

### 2.4.1 Cimentación de gravedad – acero

Es un sistema como el empleado en tierra, la base es de hormigón o acero y descansa sobre el fondo del mar.

### 2.4.2 Cimentación de monopilote

Sirve para profundidades de hasta 25 m, tiene una profundidad de clavado de entre 10 y 20 metros y el pilote de acero tiene una longitud entre 3,5 y 4,5 m.

### 2.4.3 Cimentación de trípode

Es la tecnología usada en la industria del petróleo y gas. Se utilizan estructuras de acero con tres o cuatro patas de diámetro aproximadamente 1 metro y una profundidad de clavado de 10 a 20 metros. Tiene una menor capacidad de balanceo que el monopilote y sirve para profundidades de más de 30 metros. Es una tecnología poco usada en este momento en el sector eólico (Monge, J., 2018).

En la Figura 21 se muestran los principales tipos de cimentaciones para aerogeneradores en instalaciones marinas:

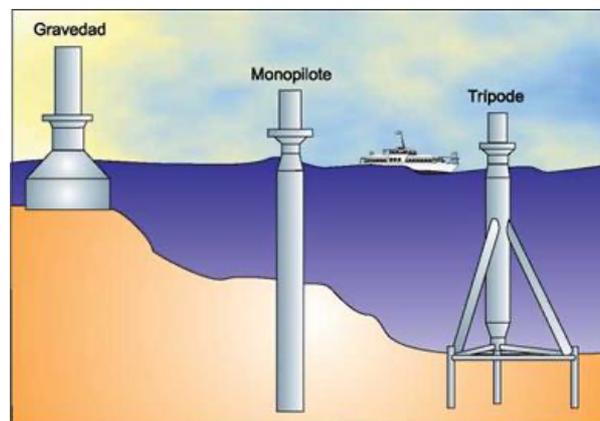


Figura 21. Representación de los anclajes de los aerogeneradores marinos (Fuente: Energy Professional Symposium, 2018)

## Capítulo 3. Explotación, desmantelamiento y repotenciación

Una vez se termina el tiempo de explotación de un parque eólico, se debe tomar la decisión de qué hacer con los aerogeneradores y todos los elementos relativos a la instalación. En el Capítulo 3 se presentan las decisiones que llevan a elegir un terreno como el idóneo para instalar un parque, y el posterior desmantelamiento o repotenciación una vez haya se haya tomado la decisión de no continuar con la explotación.

### 3.1 Explotación

Dentro de los aspectos a tener en cuenta en la selección del emplazamiento destacan: localización, en el que se incluyen la disponibilidad del terreno, el potencial eólico disponible, los accesos y complejidad del terreno, proximidad de redes eléctricas, impacto socioeconómico en la zona y situación geográfica; el entorno, los posibles obstáculos, los efectos aerodinámicos del entorno y la situación con respecto a otras turbinas, donde se considera el efecto estela (la separación entre líneas debe ser entre 5 y 7 Diámetros de rotor y la separación entre turbinas de 3 veces el diámetro del rotor); las variaciones estacionales del viento, la presencia de vientos racheados y la abundancia relativa de tormentas; la dirección predominante de la zona, la intensidad, dirección y horario; el impacto ambiental; y el coste, en el que se engloban los costes de instalación y mantenimiento, la comparativa con otras fuentes de energía locales y aspectos estatales como las ayudas o permisos (Monge, J., 2018).

Antes de establecer el proyecto de un parque eólico en cualquier emplazamiento, resulta fundamental realizar un estudio riguroso de la capacidad del viento. Existen herramientas que permitirán calcular las distribuciones espaciales de la velocidad del viento y la producción de energía esperada para asegurar la viabilidad del proyecto. Entre estas herramientas cabe resaltar el programa informático WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program), que facilita la predicción de climas y recursos eólicos y rendimientos de energía de turbinas y parques eólicos (WASP, s.f.).

Para que estas herramientas de sean útiles y fiables, se basan en datos recogidos a lo largo de los años validados por o procedentes de estaciones meteorológicas. Los resultados de estos softwares junto con las características de los aerogeneradores seleccionados para instalar (principalmente la curva de

potencia y empuje), permitirán predecir la producción energética de cada distribución de aerogeneradores (layout) (IDAE, 2006).

Una vez se ha estimado la previsión energética, para llevar el proyecto a cabo, es fundamental plantear el estudio económico. Para esto se debe plantear el coste de las instalaciones, montajes, puesta en marcha, mantenimiento... y la evaluación en el tiempo del precio percibido por cada kilovatio – hora puesto en red (IDAE, 2006). Una vez estimado esto, añadiendo la tasa impositiva correspondiente, añadiendo amortizaciones y flujos de caja, se podrá calcular la tasa interna del rendimiento (TIR) y tomar la decisión de proceder con el proyecto o no.

### **3.2 Desmantelamiento**

Una vez ha acabado la vida útil de diseño o no se quiere seguir invirtiendo en las instalaciones hechas en un parque eólico, existen dos alternativas: el desmantelamiento de la instalación, mediante el cual se eliminarán todos los elementos instalados y se dejará el terreno como estaba antes de empezar la explotación, o la repotenciación, que consiste en usar las mismas instalaciones para un parque, previsiblemente, de mayor capacidad.

Para generalizar el proceso de desmantelamiento de los parques eólicos, se han utilizado tres informes de parques hechos por MED WIND ENERGY SL (2020), Naturgy (2019) y Álvarez, A. (2021).

Se trata de tres parques, situados en Castellón, Plasencia y Asturias, y los aerogeneradores a desmantelar son: 10 aerogeneradores de potencia unitaria 3,45 MW, 15 aerogeneradores de potencia unitaria 2,625 MW, y 6 aerogeneradores de potencia unitaria 2 MW respectivamente.

Cuando se plantea un estudio de desmantelamiento de un parque, es fundamental presentar el mapa topográfico en el que se presenta la ubicación exacta del terreno y de cada uno de los aerogeneradores que constituyen el parque, así como posibles poblaciones o núcleos de población cercano. Se incluye también la potencia total del parque, de los aerogeneradores y su tipo y el tipo de tensión y trazado de la instalación eléctrica. Es un estudio que normalmente se presenta anexo al plan de instalación.

Dentro de la obra civil del parque, se diferencian los diferentes elementos:

- Zapatas
- Cimentación de torre anemométrica (de medición)

Paula Iria Tabernero Pazos

---

- Plataformas (que están situadas al lado de cada aerogenerador, son las estructuras que permiten a los operarios hacer el mantenimiento, así como en la etapa inicial de construcción del parque, elevar los diferentes elementos del aerogenerador)
- Viales y caminos
- Zanjas
- Subestación eléctrica (que a su vez se divide en el parque de intemperie y el edificio)

Para realizar el desmantelamiento del parque se tienen en cuenta las siguientes etapas:

- Identificación de todas las operaciones de desmantelamiento y restauración del medio
- Definir cada una de las tareas que llevan las operaciones detectadas en el punto anterior
- Planteamiento económico
- Cuantificación y valoración de los residuos según la legislación pertinente en materia de residuos.

Los elementos en los que se debe centrar un estudio de desmantelamiento son los siguientes:

- Aerogeneradores
- Infraestructura eléctrica: torre meteorológica, subestación eléctrica del parque, apoyos de línea de evacuación, cableado subterráneo y zanjas de la línea

Y las etapas en las que se dividen las tareas se realizan en el orden inverso al de la construcción:

1. Instalaciones: aerogeneradores, cimentaciones y plataformas, cunetas y cualquier vial que se haya construido, cableado subterráneo y zanjas, torre meteorológica (incluye el desmontaje de la torre, el desmantelamiento y la retirada de la cubrición de la cimentación, subestación eléctrica y líneas de evacuación).
2. Terreno: recuperación del suelo y tareas de vegetación. Restitución del suelo.
3. Reciclaje.

Paula Iria Tabernero Pazos

---

Se debe considerar que los elementos estructurales se verán modificados por la vegetación durante el paso del tiempo mientras la instalación está operativa, cabe esperar que, a pesar de las labores de mantenimiento, crezca vegetación y se modifique ligeramente el estado de los elementos presentando un desarrollo vegetal. Es una evolución que debe estar asumida, y debe corregirse llegado el momento de desmantelar, para que la maquinaria que accede de nuevo al terreno no tenga impedimento en realizar las tareas de desmantelamiento, por ejemplo, los caminos y zonas de tránsito deben estar en condiciones para cumplir su función inicial, que implica, entre otros, el paso de vehículos de gran tonelaje.

Para llevar a cabo el desmantelamiento, en primer lugar se debe acordar con las autoridades municipales:

- El destino de los caminos creados. Existe la posibilidad de eliminar todos ellos (principales y secundarios), mantenerlos todos, o, una opción común, que es mantener los principales y eliminar todo el resto, que son los que dan acceso particular a cada uno de los aerogeneradores
- Destino de la línea eléctrica y de la subestación
- Manera de eliminar el cableado subterráneo

Una vez habiendo notificado el cese de actividad, se debe realizar un plan de desmantelamiento con la fecha actualizada indicando cómo se va a llevar a cabo el proceso. Asimismo, se debe calcular el valor residual de los elementos a desmantelar, desconectar todos los elementos de la red eléctrica, plan de obra civil precisa (cómo llegan las grúas y camiones y elementos de transporte especiales), extracción de todos los materiales y principalmente materiales internos del aerogenerador, que son los que tienen mayor posibilidad de reutilización, desmontaje eléctrico y mecánico del resto del parque, demolición de los elementos estructurales y gestión de residuos, retirada del cableado y de la línea de evacuación, demolición de los caminos que vayan a quedar sin uso y devolución de los terrenos a su estado original (se realiza un plan para la integración en el medio de aquellos elementos que se haya acordado mantener una vez finaliza la explotación).

Para desmantelar los apoyos de la línea de evacuación, que es el conjunto de líneas de alta tensión que transfieren la energía eléctrica desde una central hasta la red que la distribuye, se debe: desmontar los conductores, los salvapájaros y los apoyos con grúa, retirar el apoyo para llevarlo al taller, cubrir la tierra de relleno y reponer tierra vegetal.

### 3.2.1 Aerogeneradores

La estructura del aerogenerador es una zapata de planta circular de hormigón armado. Dependiendo del uso posterior del terreno, se puede eliminar y revegetar, o mantener las estructuras. En caso de que las estructuras no se vayan a usar en un período de tiempo corto, se debe llevar a cabo un plan de recubrimiento de cimentaciones para taparlas.

Al finalizar la explotación de un parque eólico, se debe tomar la decisión principal sobre los aerogeneradores y es qué se hace con ellos. En caso de estar en buen estado, puede decidirse reinsertarlos en el mercado e instalarlos en otros lugares, y en caso de que sean inútiles para esta función, se dirigen a una estación de reciclado en la que se procederá a tratarlos con el fin deseado.

Para desmontarlos se debe: bajar el rotor con una grúa, desmontar las palas de buje, bajar la góndola, retirar la góndola y llevarla a un taller, desmontar las estructuras internas (escaleras, cabinas y transformador), desmontar la torre, retirar todos los cables que entran al aerogenerador, y proceder a la revegetación. Dependiendo del uso posterior del aerogenerador, se puede proceder al desguace de las piezas acorde con las dimensiones de las empresas que lo solicitan, reduciendo así el coste de transporte (Naturgy, 2019).

Para el desmantelamiento del vallado perimetral, habitualmente compuesto de malla metálica y montantes, se debe retirar y transportarlo a la planta de reciclado de chatarra correspondiente. Además, se deben retirar los macizos de cementación, fase que incluye el regado para evitar la generación de polvo, medios de seguridad, de elevación, de carga, descarga, limpieza del lugar de trabajo, relleno de los huecos que quedan en el terreno y transporte a planta.

Para plantear la fase de restauración y revegetación, se debe, en primer lugar, identificar las áreas objeto de restauración y revegetación, desglosar todas las tareas a realizar dentro de cada una de ellas, y finalmente presupuestarlo.

Dentro del plan de desmantelamiento, se deben realizar los siguientes trabajos:

- Rellenar el terreno y compactar cualquier hueco que pudiera quedar
- Remodelar el terreno, cuyo objetivo final es la máxima recuperación de las topografías originales
- Preparación del terreno para fases posteriores de plantación
- Aporte de tierra y eliminación de la pedregosidad

Paula Iria Tabernero Pazos

---

Además, es imprescindible presentar qué se hará con cada uno de los siguientes elementos:

1. Cimentaciones
2. Viales y cunetas
3. Zanjas y cableado subterráneo
4. Superficie de la subestación
5. Superficie de la torre meteorológica
6. Superficie de los apoyos de la línea de evacuación
7. Zonas de almacenamiento durante las obras de desmantelamiento

### **3.2.2 Residuos**

Los residuos no reciclables deben ser tratados por un gestor autorizado de residuos inertes. Aquellos considerados como peligrosos o materiales especiales deberán ser trasladados a instalaciones para su tratamiento (MED WIND ENERGY SL, 2020). Los materiales resultantes del desmantelamiento deberán ser gestionados por el Reglamento de Residuos de la Comunidad Autónoma, y debe priorizarse su reutilización.

Se consideran residuos reciclables: materiales férreos, que se trasladan a planta de reciclado de chatarra, vidrios, plástico procedente de tuberías subterráneas de PVC, cableado, residuos de demolición y obra civil. En el caso de este tipo de residuos, el proceso se realiza en el orden en el que se presenta, que, en resumen, es el siguiente: desmontaje de los aerogeneradores, desmontaje de la estación de medición y de los circuitos eléctricos y subestación eléctrica, eliminación de infraestructuras y finalmente restauración ambiental.

En la Figura 22 se muestra el cronograma para el desmantelamiento del parque eólico Arriello II, en Castellón (10 aerogeneradores de 3,45 MW de potencia unitaria. Altura del rotor 126 m y altura de buje 112m).

Paula Iria Tabernero Pazos

ACTUACIÓN	MES							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Desmontaje de los aerogeneradores	■	■	■	■				
Desmontaje de la estación de medición	■							
Desmontaje de los circuitos eléctricos		■	■	■				
Desmontaje de la subestación eléctrica			■	■				
Desmontaje de los sistemas de control y red de tierras			■	■				
Eliminación de infraestructuras y cimentaciones					■	■		
Restauración ambiental final							■	■

Figura 22. Cronograma del desmantelamiento del parque eólico Arriello II (Fuente: MED WIND ENERGY, 2020)

Teniendo en cuenta el problema que se está creando a partir del envejecimiento de los aerogeneradores, WindEurope ha planteado un modelo de desmantelamiento con el fin de conseguir, en un plano futuro, un plan global de actuación. Dentro de lo instalado en tierra, cerca de 34 mil turbinas en Europa tienen 15 años o más de antigüedad, lo que representa 36 GW de capacidad. Dentro de este grupo, aproximadamente 9 GW tienen de 20 a 24 años o más y 1 GW más de 25 años. En la Figura 23 se muestra la distribución de la edad que tienen los aerogeneradores instalados actualmente en Europa (Wind Europe, 2020).

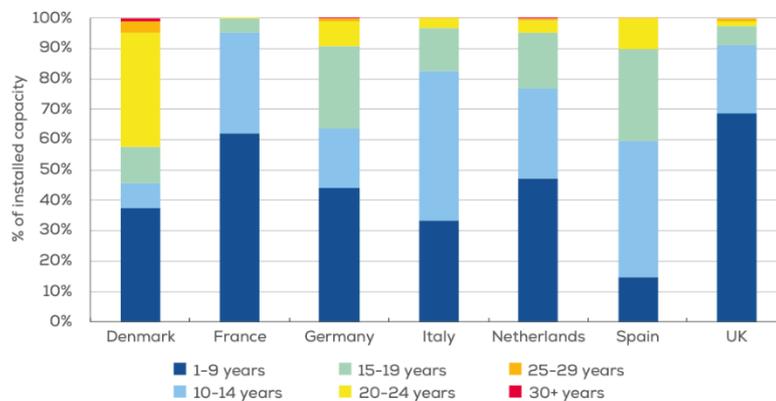


Figura 23. Distribución de la edad de los aerogeneradores en Europa (Fuente: Wind Europe, 2020)

La vida media de los aerogeneradores es de 20 – 25 años, pero hay algunas que se están operando por encima de este tiempo. Esto permite la posibilidad de repotenciar parques, pero hay que tener en cuenta los costes relativos al desecho de los elementos ya inútiles.

Dentro de Europa, los países que destacan dentro del sector eólico son Dinamarca, Francia, Alemania, Italia, Países Bajos, España y el Reino Unido. Pero cada uno de ellos tiene una normativa diferente en lo que se refiere a

desmantelamiento. En España, por ejemplo, no están encuadradas las acciones del desmantelamiento de las turbinas, esta información debe estar planteada en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) de cada proyecto. Países como Italia, Francia o Países Bajos tiene su propia regulación en la que se establecen las acciones que se deben llevar a cabo y en los plazos en que se debe proceder.

La Directiva de Marco de Residuos (WFD) define los conceptos básicos relacionados con la gestión de residuos. Pone énfasis en la reducida disponibilidad de terrenos y destaca la necesidad de extender la responsabilidad del reciclaje a los productores. Establece que estos residuos deben ser gestionados sin poner en peligro la salud humana y el medioambiente.

La decisión del desmantelamiento de un parque o de una turbina viene de los siguientes factores:

- La turbina ha sufrido daños que comprometen la seguridad de las operaciones en el área
- Los contratos de terreno han expirado y no pueden ser renovados
- La licencia de explotación ha expirado
- La operación ya no es económicamente viable
- Se lleva a cabo un plan de repotenciación

En función de los factores anteriores, se debe tomar una decisión de inversión en nuevos equipos o reparaciones o el desmantelamiento total del parque. Según el estado de las turbinas acabada una instalación, en primer lugar se decidirá si se venderán a un nuevo mercado para ser usadas como turbinas eólicas completas o si se dispondrá de las piezas por separado para darles un nuevo uso. La mayor parte de los contratos de cesión de terreno contienen cláusulas en las que se incluye la total restauración y eliminación de materiales y devolución del terreno a su estado inicial.

### **3.3 Repotenciación**

Se define repotenciación como: “la modificación de un parque eólico en explotación que suponga la sustitución total o parcial de los aerogeneradores o de cualquiera de sus elementos principales, con el fin de incrementar la producción en el emplazamiento”. Según la definición de Repowering de la nueva Directiva de Renovables (Art. 2.10)

Paula Iria Tabernero Pazos

La repotenciación permite instalar aerogeneradores más modernos y con una tecnología más actualizada, entre elementos de fabricación, paquetes de software, etc. lo que conseguirá integrar las operaciones técnicas y económicas del proceso. Los primeros parques eólicos instalados en España son en los que se debería ir valorando la opción de repotenciar, debido a los nuevos aerogeneradores capaces de obtener más energía debido a que están en los emplazamientos idóneos. La repotenciación consiste en una inversión a largo plazo, dado que, en el momento de tomar la decisión, generalmente, será más caro repotenciar que seguir con el mantenimiento de las máquinas tal como están. No obstante, el impacto ambiental, y principalmente visual que genera el parque es previsiblemente menor debido a que con las máquinas actuales se necesita un menor número en comparación con las instaladas en parques de hace años (Asociación Empresarial Eólica, 2019)

Generalmente, en España, solo se procede a la repotenciación de una instalación eólica cuando los elementos se han quedado obsoletos y no existen recambios que permitan alargar su vida útil. Es por esto por lo que, en España, cerca de 10000 MW tienen una antigüedad superior a 15 años, y 2300 MW superior a 20 años (Asociación Empresarial Eólica, 2020).

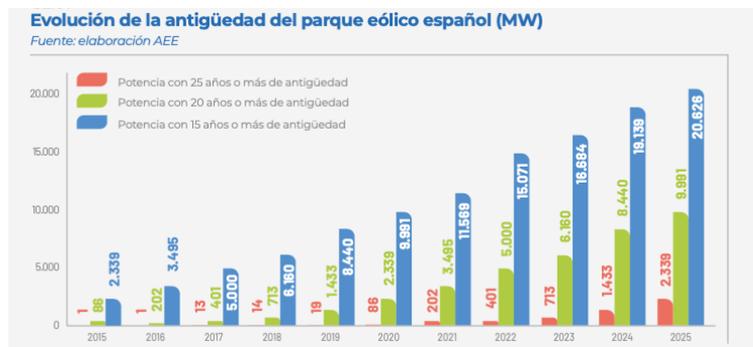


Figura 24. Evolución de la antigüedad de los parques eólicos en España (Fuente: AEE, 2020)

A pesar de que esta es una opción viable, la tendencia actual no es la repotenciación sino la extensión de la vida útil más allá de los 20 años para los que estaban diseñados. Por esto se han tomado una serie de medidas, según AEE, entre las que destacan la simplificación de la tramitación de todos los proyectos de repotenciación, y establecimiento de un marco retributivo a través de subastas de repotenciación.

## Capítulo 4. Impacto ambiental

Para poder analizar el impacto ambiental de un proceso, se debe tener claro que un impacto ambiental es una modificación, adversa o beneficiosa, que impacta directamente en el medio ambiente como consecuencia directa de la actividad humana (Morales, 2021). Los principales factores sobre los que se debe plantear el estudio, y a los que van a beneficiar o perjudicar son:

- El ser humano, fauna y flora
- Suelo, agua, aire, clima y paisaje
- Bienes materiales y patrimonio cultural
- Cualquier tipo de interacción entre los elementos anteriores

Para poder estudiar el impacto ambiental, que se plantea de manera global sobre un proceso, se deben estudiar por separado los aspectos ambientales. Estos son la parte de una actividad susceptible de generar el impacto al medio ambiente.

Para realizar una buena gestión medioambiental, cuya competencia es de la persona responsable de la gestión medioambiental en una empresa u organización, los pasos a seguir son los siguientes (Escuela de Empresa, 2019):

1. Caracterizar e identificar los procesos
2. Identificar los aspectos ambientales y sus impactos ambientales, con el objetivo de que todas las actividades relativas al proyecto tengan el mínimo impacto ambiental posible
3. Identificar y aplicar la legislación aplicable al proyecto
4. Establecer objetivos de medio ambiente por encima de lo mínimo legalmente exigido (presente en la ISO 14001)

Con el fin de identificar qué elementos deben estar presentes dentro del estudio de impacto ambiental, se debe consultar la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, en el que recoge lo que debe estar presente en un estudio de impacto ambiental simplificado (Boletín Oficial del Estado, 2013). Entre dichos elementos destacan la descripción de los aspectos ambientales afectados por el proyecto, y la descripción y evaluación de los efectos del proyecto en el medio ambiente que sean consecuencia de:

- Emisiones y deshechos previstos y generación de residuos

Paula Iria Tabernero Pazos

---

- Uso de recursos naturales (suelo, tierra, agua y biodiversidad)
- Identificación, descripción, análisis y cuantificación de los efectos esperados
- Medidas de prevención, reducción, compensación y corrección de los efectos sobre el medio ambiente
- Realizar el seguimiento de forma que garantice cumplir las indicaciones y medidas protectoras y correctoras

La legislación vigente reside en el anexo I de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental, dentro del Grupo 3 Industria energética, epígrafe i: Instalaciones para la utilización de la fuerza del viento para la producción de energía (parques eólicos) que tengan 50 o más aerogeneradores, o que tengan más de 30 MW o que se encuentren a menos de 2 km de otro parque eólico en funcionamiento, con autorización administrativa o con declaración de impacto ambiental. De acuerdo con el artículo 7 de la norma citada, los parques eólicos están sometidos a procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental ordinaria, debiéndose elaborar el correspondiente estudio de impacto ambiental con la información establecida por la citada norma (Enerfín, 2020). De manera autonómica, se deberá acudir a la legislación pertinente en materia de protección ambiental aplicable a cada comunidad autónoma, tal como se ha presentado con anterioridad.

Según el modelo de evaluación planteado por el Banco Mundial (IBRD, 1991) y la Guía metodológica para la elaboración de estudio de impacto ambiental de la dirección general de medio ambiente (Ministerio de Medio Ambiente, 1989), se plantean una serie de factores fundamentales que se deben considerar al realizar una instalación industrial, en el caso objeto de estudio un parque eólico:

- Identificar qué acciones concretas del proyecto son susceptibles de causar daños a cualquier aspecto relativo al medio ambiente
- Identificar los elementos en los que se pueden ver reflejados dichas acciones
- Planteamiento de una matriz causa – efecto
- Valorar el impacto
- En función del impacto, plantear medidas correctivas, preventivas y compensatorias
- Averiguar el valor final del impacto una vez aplicadas las medidas correctivas, preventivas y compensatorias

Paula Iria Tabernero Pazos

---

- Establecer un Plan de Vigilancia Ambiental que permita el seguimiento de las medidas establecidas

Como condiciones previas no aptas o incompatibles con el establecimiento de un parque eólico se presentan las siguientes:

- Presencia de núcleos de población en el entorno (desde 250 hasta 1000 metros mínimos desde el aerogenerador hasta cualquier zona poblada, rango que varía según la Comunidad Autónoma, tal como establece el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico).
- Presencia de bienes que constituyan patrimonio histórico o cultural en el entorno
- Zonas que no sean aptas por la presencia de riegos naturales (zonas inundables de riesgo alto y medio) o zonas de movimientos en masas
- Zonas en las que el perímetro de protección de la habitabilidad impida la protección de vida, causando afecciones por ruidos, sombras o impedimentos relativos al parque
- Zonas de extracción en explotación
- Perímetros de explotación agrícolas o ganaderos
- Balsas de riego

#### **4.1 Fases del estudio**

Para estudiar el impacto durante todo el proceso de un parque eólico, se plantean las siguientes fases:

##### **4.1.1 Preparación del terreno.**

Desbroce y despeje de la vegetación, tránsito de vehículos portadores, excavación en el terreno para montaje de apoyos y aerogeneradores, construcción de cableado eléctrico, edificio de control y transformación e instalación de la línea eléctrica.

##### **4.1.2 Explotación de la instalación**

Mantenimiento, presencia de elementos ajenos a la fauna y flora, de los aerogeneradores y de la red eléctrica. En caso de que el parque sufra una repotenciación pasados entre 20 y 25 años o el tiempo considerado como fin de vida útil en función del modelo de aerogenerador, comprobar el estado de viales ya que esto implica la vuelta al tránsito de vehículos, y posible reemplazamiento del cableado eléctrico si la nueva instalación tiene una capacidad diferente a la original.

### 4.1.3 Desmantelamiento del parque

Eliminar los aerogeneradores (en ocasiones despiece de estos en el emplazamiento), movimiento de vehículos y maquinaria, restauración de la zona y restauración última del terreno.

Para cada una de las fases anteriores se debe plantear el impacto de cada una de las acciones que tengan lugar en la fase, con una diferenciación global (+ ó -) del impacto que producen, y una descripción del carácter global de la acción, en la que se dividirán en dos categorías: no significativos y significativos, en este último caso es en el que se centrarán las medidas preventivas, correctivas y compensatorias (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020).

Según la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación de Impacto Ambiental, (modificada por la Ley 9/2018 de 5 de diciembre), la valoración de los impactos ambientales se divide en los siguientes subgrupos:

- Impacto ambiental compatible: no necesita medidas preventivas o correctivas y acaba una vez cesa la actividad que lo produce
- Impacto ambiental moderado: no precisa medidas preventivas o correctivas excesivas, y cesa pasado cierto tiempo de que se finalice la actividad que lo produce
- Impacto ambiental severo: sí necesita medidas preventivas o correctivas relevantes y, aún aplicándolas, necesita un tiempo amplio para la recuperación
- Impacto ambiental crítico: supone una pérdida no recuperable de las condiciones medioambientales al inicio de la actividad. Su magnitud supera los niveles críticos aún aplicando medidas correctivas

Según la Ley de evaluación ambiental (artículo 35.1 y Anexo VI), modificada por la Ley 9/2018, de 5 de diciembre, para realizar un estudio de impacto ambiental de un parque eólico, se debe presentar la relación de compatibilidad con la planificación sectorial energética a nivel nacional y autonómico. Referido a ubicación y características del proyecto, especificar la localización en coordenadas, características y dimensiones de todos los elementos relativos al proceso, teniendo en cuenta el proyecto global que incluye todos los aerogeneradores, infraestructuras e instalaciones necesarias para la conexión del parque a la Red de transporte de la REE (*Red Eléctrica Española*).

Paula Iria Tabernero Pazos

---

En lo que respecta a fases de diseño y construcción, describir la totalidad de los elementos de este y las actividades, superficie de trabajo e instalaciones temporales o permanentes necesarias para su construcción. Los aerogeneradores deben presentarse con todas sus características: potencia, localización exacta en coordenadas, peso, color, dimensiones de la plataforma de montaje y desmontaje, cimentación, número total...

Deben aparecer también las medidas, localizaciones materiales y la superficie que ocupa la torre anemométrica, así como los caminos de acceso y viales internos de servicio, diferenciando entre los caminos de acondicionamiento nuevos y los temporales hechos para las construcciones permanentes, así como los viales de concentración del transporte de materiales y del tráfico de vehículos y maquinaria; y las vías de concentración del transporte. Se debe detallar qué maquinaria se va a utilizar. También debe plantearse la red subterránea de interconexión del parque y los centros de control y saneamiento (MITECO, 2020).

En cuanto a conexiones, se debe describir todos los tramos eléctricos, bien sean subterráneos o aéreos; la subestación eléctrica, la conexión a la red de transporte y el sistema de iluminación y señalización nocturna del parque.

Asimismo, se debe presentar todo lo referido a cartografía y elementos naturales: superficies afectadas por movimientos de tierra, instalaciones y superficies necesarias para la construcción, suelo a ocupar, recursos naturales que se precisan para la ejecución del proyecto, y en cuanto a planificación y residuos, se deben presentar las cantidades, tipos y composición de residuos, vertidos o emisiones, el mantenimiento previsto de la maquinaria con el riesgo de vertidos que se considere, y finalmente el cronograma de construcción y funcionamiento, y explícitamente los días de la semana y franjas horarias en las que se llevará a cabo la actividad constructiva.

#### **4.1.4 Resumen de impactos**

Dentro de la construcción de un parque eólico, hay una serie de impactos que cualquier instalación (terrestre) tendrá en común, aunque sus valores podrán fluctuar en función de la localización, el estado previo del terreno o condiciones de medio ambiente. Dentro de estos impactos destacan: en lo referido a medio físico: cambio climático, aire, calidad acústica, geología, edafología e hidrología. En el medio biótico: vegetación y fauna. En el medio perceptual:

Paula Iria Tabernero Pazos

---

paisaje, luminiscencia de balizas y campos electromagnéticos. En cuanto a salud, principalmente el efecto sombra y la calidad acústica. En cuanto a panorama socio económico destacan el sistema económico y el territorial, y finalmente el patrimonio histórico y cultural.

Todos ellos se agrupan según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), en los siguientes grupos, de los cuales se debe hacer identificación y valoración de impactos ambientales significativos. Estos elementos deben estar recogidos dentro del inventario ambiental, y esta información debe ser contrastada con la recogida en el trabajo de campo. Dentro de este inventario, como mínimo, se deben incluir los siguientes puntos (MITECO, 2020).

- Suelo, subsuelo y geodiversidad, en el que se incluyen geoparques, Lugares de Interés Geológico (LIG), elementos del patrimonio geológico relevantes catalogados por el IGME (Instituto Geológico y Minero de España), el relieve original del terreno en el ámbito de implantación e información del Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES).
- Agua, con la cartografía de masas de agua, la del dominio público hidráulico y la referente a zonas inundables y sus periodos de retorno.
- Otros recursos naturales utilizados para la fabricación de los elementos y tecnologías seleccionados para el proyecto.
- Aire y clima, con los estudios correspondientes al ruido base, nocturno y diurno, y la calidad del aire, caracterización meteorológica de vientos y niebla, y los núcleos habitados o granjas próximas al parque
- Vegetación y hábitats de interés comunitario con los mapas de distribución de tipos de vegetación presentes en todo el proyecto, masas arboladas que sean sumideros de CO<sub>2</sub>, árboles y rodales catalogados y riesgo de incendio en la zona.
- Flora, en el que se detallan todas las especies que puedan verse afectadas por algún elemento o acción del proyecto en todo su ámbito.
- Fauna, parte en que se especificará según el órgano competente de cada Comunidad Autónoma. Se deben presentar: catálogo de animales que utiliza o sobrevuela la zona, ficha para cada especie, caracterización del uso que hacen las especies de la zona, caracterización del sobrevuelo en caso de aves, y otras especies de grupos especiales (que figuren en el Anexo II de la Directiva de Hábitats como vulnerables o en peligro).
- Espacios naturales protegidos y áreas protegidas por instrumentos internacionales, para cada uno de ellos se presentará la norma de

declaración, el instrumento de gestión, las determinaciones de su zonificación y regulación a efectos de evaluación.

- Población y salud humana, en el que se identifica y caracteriza la cartografía de los núcleos de población, viviendas y áreas con usos sensibles y objetivos de calidad acústica. En este apartado debe incluirse el estudio socioeconómico del ámbito afectado por el proyecto.
- Uso de la tierra, en el que se incluye la cartografía de la zonificación que afecta al proyecto y los planes de urbanismo y ordenación del territorio.
- Bienes materiales, como montes de utilidad pública, vías pecuarias, senderos de uso público...
- Patrimonio cultural, con la identificación y cartografía de los elementos del patrimonio cultural presentes
- Paisaje, en el que se incluye un estudio del paisaje en un radio de 10 km, pueblos, líneas (carreteras o senderos) y miradores en una extensión de 25 km, y el carácter, calidad y objetivos del paisaje establecidos en el entorno afectado, también con una extensión de 25 km.

#### **4.1.5 Valoración de los impactos ambientales significativos**

Se presenta, como continuación del estudio de impacto ambiental, la valoración de los impactos ambientales significativos. Una vez hecho esto se plantean, en el apartado de medidas preventivas, correctivas y compensatorias, todas las acciones llevadas a cabo para cada uno de los impactos anteriores y con soluciones o reducciones de impactos.

#### **4.1.6 Medidas preventivas, correctivas y compensatorias**

Una vez están planteados todos los aspectos anteriores, así como evaluados, se debe obtener que el resultado es viable, con una fase de construcción compatible con el medio en el que se realiza, y la fase de explotación no constituye un impacto grave. Siempre que existan impactos, se tienen que plantear las medidas cuyo objetivo será mitigar sus efectos. Se deben cuantificar, y en caso de que no resulten despreciables, contrarrestarlos a través de medidas compensatorias. Cada medida debe estar presupuestada y programada en el tiempo con acciones para cada una de ellas, y se deben reflejar en la cartografía con el mismo detalle que el resto de las actuaciones del proyecto (MITECO, 2020).

Paula Iria Tabernero Pazos

---

Ejemplos de las acciones concretas para mitigar los efectos de los impactos son:

- Suprimir o modificar la localización de los elementos del proyecto para evitar que afecten a bosques o montes bajos o minimizar el daño
- Seleccionar modelos de aerogeneradores o subestaciones con menores emisiones sonoras
- Soterrar los tendidos eléctricos para evitar las colisiones y electrocuciones de animales
- Compensar a la población susceptible de ser perjudicada por impactos sobre actividades actuales
- Emplear vehículos y maquinaria con bajos consumos de combustibles fósiles
- Establecer un protocolo de actuaciones en caso de producirse vertidos accidentales
- Señalizar e instalar sistemas de protección de recintos con poblaciones o hábitats sensibles

Como últimos contenidos del estudio ambiental, se debe plantear la manera de mitigar los impactos ambientales derivados de la vulnerabilidad del proyecto frente a accidentes graves o catástrofes y la evaluación de repercusiones sobre espacios Red Natura 2000, que es una red ecológica europea de áreas de conservación de la biodiversidad (MITECO, 2021).

La Figura 25 se muestra el mapa de Espacios Naturales Protegidos (ENP), actualizado en julio de 2021, y en Figura 26 los espacios Red Natura 2000 en España:

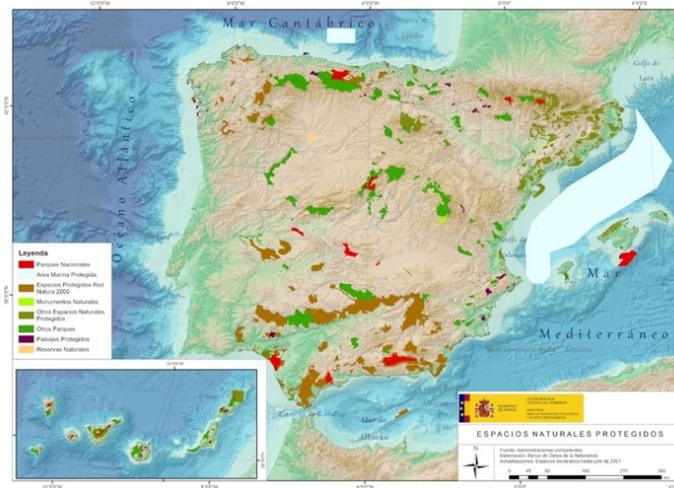


Figura 25. Mapa de Espacios Naturales Protegidos (Fuente: MITECO, 2021)

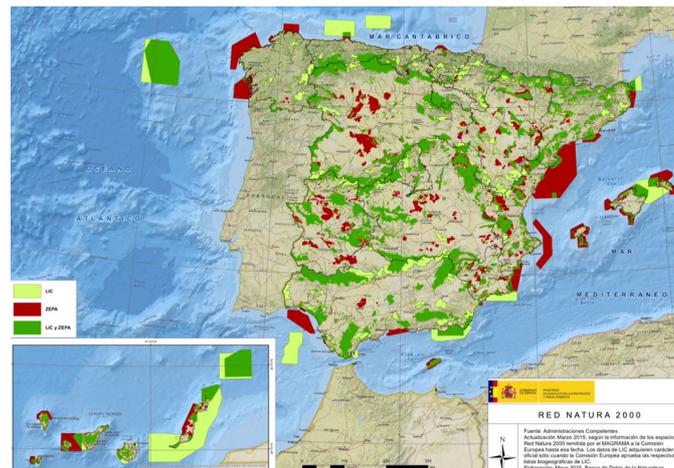


Figura 26. Mapa de zonas de la Red Natura 2000 (Fuente: MITECO, 2015)

El objetivo final de la realización de un estudio de impacto ambiental es minimizar los efectos que la instalación tiene sobre el medio ambiente. Los parques eólicos generan residuos y emisiones, principalmente derivadas del transporte de componentes y la instalación, pero los efectos adversos que tienen sobre el medio ambiente son mucho menores que los de instalaciones de generación de energía mediante combustibles fósiles. A continuación se presenta el balance de emisiones en el proyecto Azazeta, en Álava como ejemplo de la reducción de efectos que este tipo de instalaciones tienen en comparación con instalaciones tradicionales.

Paula Iria Tabernero Pazos

---

Según el estudio realizado por Naturiker, consultora de fauna silvestre, cada kWh de energía generada mediante eólica en lugar de carbón evita (Naturiker, 2020):

- 0,6kg de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono)
- 1,33 gr de SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre)
- 1,67 gr de NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno)

Una planta de 3 MW de eólica produce la misma energía obtenida por una central de quema de carbón al quemar 1000 kg de carbón. El impacto que supone no quemar esos kg de carbón supone evita la emisión de 4109 kg de CO<sub>2</sub>. Se elimina, asimismo, la emisión de 66 kg de dióxido de azufre y 10 kg de nitrógeno, que son los principales elementos que causan la lluvia ácida.

Según el estudio planteado por Naturiker del caso del parque eólico “Azazeta”, en el que se plantea una instalación de potencia eólica de 40MW, se considera una producción neta de 109 876 MWh/año. Según datos de fabricante, cada KW/h producido consume 6 g de CO<sub>2</sub>, lo que supondrá una emisión de 0,69 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. Se calcula con el factor 0,357 t CO<sub>2</sub>/MWh, y se evita mediante la instalación del proyecto aproximadamente 39 toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

Una estación eólica de 25 MW, produce aproximadamente 58 750 MWh/año, 3350 horas equivalentes en función de la localización, tecnología... que es el equivalente al consumo de 18 000 familias. Para obtener esta energía usando petróleo, se necesitan 5000 toneladas equivalentes de petróleo, de manera que se evita la emisión de cerca de 21 850 toneladas anuales de CO<sub>2</sub> (considerando el factor 0,357 t CO<sub>2</sub> / MWh).

La huella de carbono de los parques eólicos se estudia aplicando la huella de carbono de producto, y es necesario considerar el ciclo de vida completo del parque, lo que comprende:

- Extracción, tratamiento y modificación de todas las materias primas necesarias para construir o fabricar los elementos del aerogenerador
- Maquinaria y materiales necesarios para fabricar el aerogenerador
- Construcción y funcionamiento de los parques
- Desmantelamiento y retirada de los elementos cuando llega el final de su vida útil.

## Capítulo 5. **Alargamiento de vida útil de un aerogenerador**

En este Capítulo se plantea la metodología hecha por ISO para valorar el ciclo de vida de los productos, y la posibilidad de ampliarla aplicando mantenimiento predictivo y una buena lubricación de los componentes.

### **5.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV de ISO 14040:2006)**

Una de las técnicas que ha desarrollado la norma ISO, debido al creciente interés por los impactos ambientales de los productos y derivados de los servicios que se utilizan en la sociedad actualmente, es el análisis del ciclo de vida (ACV), que pretende ayudar a identificar oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de los productos a lo largo de su ciclo de vida, aportar información a personas que vayan a tomar decisiones relativas al ciclo de vida de algún producto, selección de indicadores de desempeño ambiental y marketing.

Existen más técnicas de análisis para esta etapa, como la consultoría ambiental, la evaluación del riesgo o la evaluación del desempeño ambiental. En el caso del análisis de ACV según ISO, no contempla los asuntos sociales o económicos del proceso, cuya evaluación se presenta más adelante en el desarrollo de este proyecto. La aplicación de alguna de ellas o el conjunto de todas para estudiar una instalación debe decidirse en la parte de evaluación del proyecto por la persona responsable (ISO, s.f.).

Todo esto está recogido en la Norma ISO 14011, dentro de la 14000, que es la Norma relativa a los Sistemas de Gestión Ambiental, que principalmente expone un equilibrio entre desarrollo económico y disminución de impacto ambiental de los proyectos y procesos llevados a cabo en la industria.

La Norma presenta el análisis de ciclo de vida en cuatro etapas:

1. Fase de definición del objetivo y el alcance
2. Fase del análisis del inventario
3. Fase de evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida (EICV)
4. Fase de interpretación (en la que se interpretan los resultados para tomar decisiones y se plantean las conclusiones)

A pesar de que fue ISO quien estandarizó las normas relativas al Análisis de Ciclo de Vida, el SETAC (Society of Environmental Toxicology Chemistry) fue la organización encargada de potenciar esta investigación. Además, parte de las investigaciones más relevantes en este ámbito han sido presentadas por SPOLF (Society for the Promotion of Life Cycle Development), y uno de los estudios más importantes que se han hecho a nivel nacional es “Life cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method” (Martínez, Sanz, E., Pellegrini, Jiménez, y Blanco, 2009), hecho por profesores de la Universidad de La Rioja.

Los autores de este estudio plantean la necesidad de cuantificar el impacto ambiental para poder comparar los efectos de la producción de energía y analizar las posibilidades de mejora de este tipo de producción de energía desde este punto de vista. Concluyeron, en 2009, que los principales elementos que tienen un impacto negativo significativo sobre el medio ambiente son las palas de las turbinas, especialmente las partes no reciclables, y el cobre presente en la góndola, aunque en este caso *“tiene la ventaja de que es un material reciclable”*.

Los autores concluyen, una vez analizada la instalación de una turbina eólica y estimando como tiempo de ciclo 20 años, que la contaminación resultante de todas las fases se recupera en menos de 1 año. Establecen también que es posible reducir los efectos ambientales de los procesos de manufactura y reciclado de las turbinas eólicas y sus componentes (Martínez, Sanz, E., Pellegrini, Jiménez, y Blanco, 2009),

A pesar de estos datos, se está planteando un tipo de tecnología en constante desarrollo: en el 2020, un 23,8% de las patentes realizadas (Según OEPM), corresponden a tecnología relativa a la eólica. La mayor cantidad de patentes del sector se centra en el rotor y las palas. Además, en septiembre de 2021, Siemens Gamesa sacó al mercado la primera turbina eólica completamente reciclable (Siemens Gamesa, 2021) y otras empresas como Vestas tienen como objetivo que las nuevas instalaciones de eólica que instalen estén compuestas por palas 100% reciclables (Richard, C., 2021).

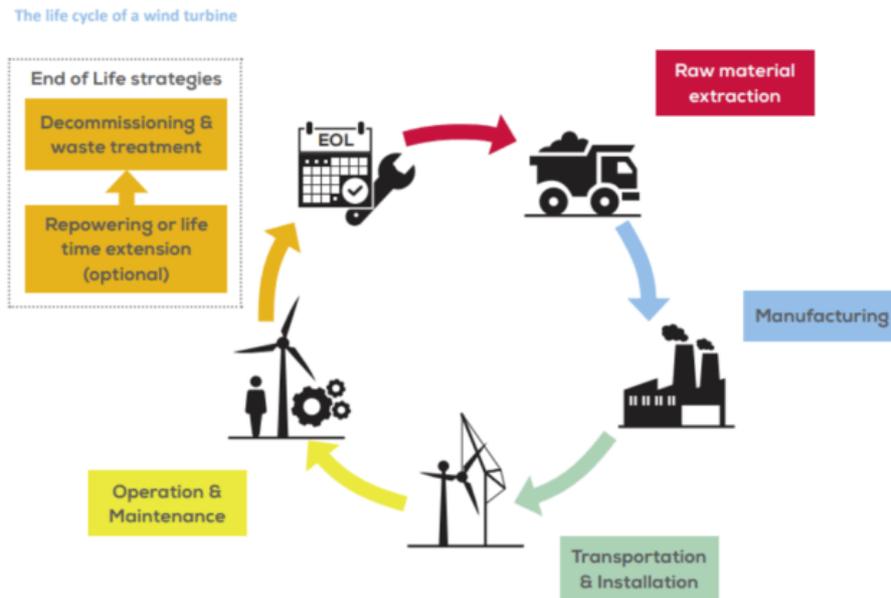


Figura 27. Ciclo de vida de una turbina eólica (Fuente: WindEurope, 2020)

## 5.2 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento de las máquinas o mecanismos se realiza para que los elementos de la maquinaria se mantengan en el mejor estado posible, siendo una fuente de ventaja competitiva incluida dentro del desarrollo de las empresas. Mediante su uso se reducen costes, se mejora la estabilidad de los procesos, se amplía la vida útil de la maquinaria, se reduce el inventario de repuesto y se reducen las pérdidas de tiempo (Asiain, J., 2021). Según la ISO 14224:2016, se clasifican los tipos de mantenimiento en función de si se realiza antes o después del fallo, tal como se muestra en la Figura 28:

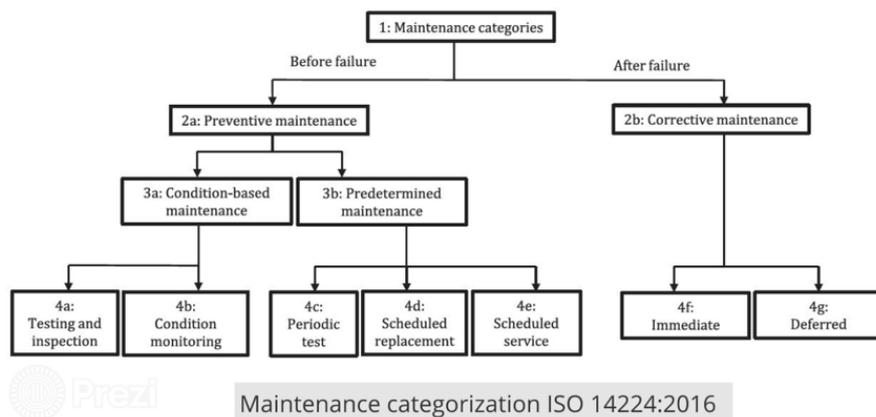


Figura 28. Categorización del mantenimiento según ISO (Fuente: ISO, 2016)

Los principales tipos de mantenimiento son: correctivo, predictivo y preventivo. El mantenimiento **correctivo**, aplicable después del fallo, puede realizarse de manera inmediata o en diferido, y se aplica cuando los fallos son evidentes visualmente, no hay riesgo para las personas ni el medio ambiente y no hay posibilidad de implantar otra técnica de mantenimiento (Asiain, J., 2021). Las acciones que se llevan a cabo en este tipo de mantenimiento son: reparación, extracción, reemplazo de partes... En las instalaciones eólicas, pueden englobarse pequeñas reparaciones o cambios de componentes pequeños, y también el cambio de rotor, generador, multiplicadora o tramo.

El siguiente tipo de mantenimiento es el **predictivo**, basado en la condición, en el que destacan las acciones de inspección y testeado y monitorización de las condiciones continuamente. Las inspecciones pueden ser: monitoreo mediante ultrasonidos, ensayos no destructivos, análisis visual... (Asiain, J., 2021). Todos los datos recogidos en estas tareas deben ser relevantes y con fácil capacidad de análisis, pues si no tienen estas características será un desperdicio y no permitirá tomar decisiones, que es el objetivo final de la obtención de datos.

El siguiente tipo de mantenimiento, el **preventivo**, que está basado en el tiempo, y es un mantenimiento programado. Para realizarlo se hacen tests periódicos, paradas planificadas y servicio planificado. Acorde con lo averiguado en estas inspecciones, las tareas típicas a realizar pueden ser lubricar la maquinaria, filtrar partículas para un mejor uso de las partes, limpiar aquellos elementos que lo precisen... En aerogeneradores, las acciones habituales son el reapriete y comprobación de pernos, comprobaciones de

Paula Iria Tabernero Pazos

---

engrase, revisiones exhaustivas del aerogenerador o cambios de aceite (Contreras, R., Mateo, A., 2006).

Actualmente se plantea otro tipo de mantenimiento, que se denomina proactivo y que pretende ser una mezcla entre el mantenimiento predictivo y el preventivo. Aplicado al sector eólico, el objetivo es prever cómo va a actuar el aerogenerador, para que permita programar las paradas de antemano y hacer cambios de los elementos, adelantándose así al fallo y evitando incurrir en gastos imprevistos (Alertec, 2021).

Alberto Blasco, director de operaciones de Siemens Gamesa, plantea el porqué de la extensión de vida de los parques eólicos: se estima que, para 2028, 65 GB de potencia en Europa alcanzarán el final de vida de diseño. Muchos de los propietarios de parque tienen gastos de mantenimiento exponenciales hacia el final de la vida útil de diseño, y las alternativas a este desembolso son:

- Desmantelamiento
- Repotenciación
- Extensión de vida

El objetivo de la extensión de vida consiste en maximizar la inversión inicial. Los costes de mantenimiento, analizados en la Figura 29, son prácticamente lineales durante toda la vida útil, según diseño, del aerogenerador. Pasados los 20 – 25 años, la estadística crece de manera exponencial debido a las especificaciones establecidas para su mantenimiento.

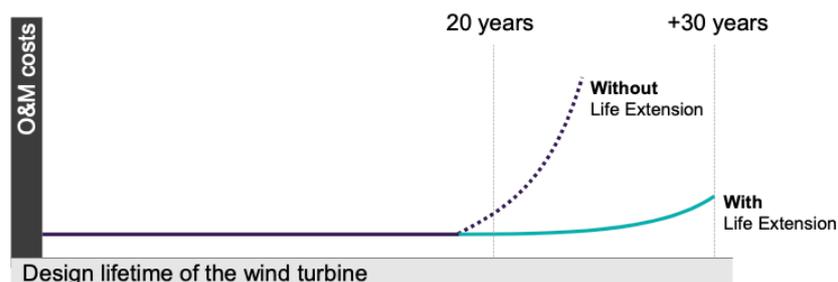


Figura 29. Gráfico de relación coste – vida de un aerogenerador (Fuente: Blasco, A., 2021)

Para realizar esto se plantean dos alternativas principales, en primer lugar, aplicar la técnica conocida como “RUL” (Remaining Use of Life), que es el cálculo de vida para aumentar el valor de los campos eólicos, y gracias a ella se avala que realmente los activos tienen una vida remanente, revalorizando así el parque. Es realizado principalmente por dueños de parques que no

Paula Iria Tabernero Pazos

quieran invertir en maximizar la vida del parque. Como segunda opción, se plantea la extensión de vida como tal del parque, que es una solución para aquellos propietarios de parques que lo que quieren sea seguir generando energía minimizando el riesgo mediante la realización de un buen mantenimiento de sus activos (Blasco, A., 2021).

Aparte de todos los esfuerzos que se deben realizar para conservar los sistemas en buenas condiciones, lo primordial es enfatizar en el mantenimiento predictivo y constante durante toda la vida útil de diseño. Una vez llegado este momento, se deben planificar una serie de inspecciones periódicas, en las que la periodicidad depende de los datos obtenidos en cada una de ellas y los análisis de datos permitirán programar temporalmente la siguiente. Estas inspecciones aseguran que el activo está bien mantenido.

La extensión de vida se fundamenta en un programa de mantenimiento que permita seguir operando el parque, estableciendo refuerzos o mejoras en el año óptimo, inspecciones optimizadas con el objetivo de contener costes durante el período de extensión de vida, reparaciones en la fase inicial (que detectadas en este momento resultarán sencillas y/o baratas), y el desarrollo de mejoras de control e incremento de AEP, que es la Producción Media de Energía (IDAE, 2020). Como resumen de esto, desde Siemens Gamesa se plantea un gráfico explicativo que se muestra en la Figura 30:

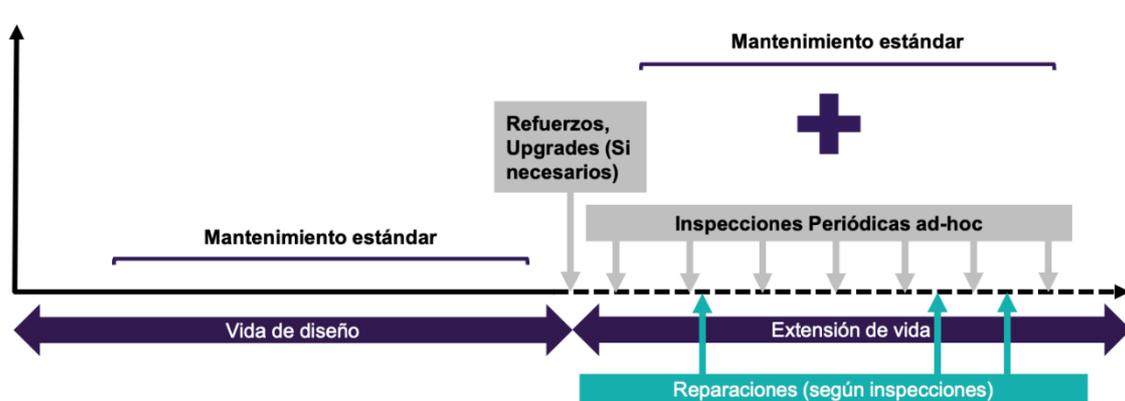


Figura 30. Extensión de vida de un aerogenerador mediante mantenimiento (Fuente: Blasco, A., 2021)

Como ejemplo de viabilidad de este planteamiento, se presenta la operativa de modelos del Ebro, desarrollada por el grupo Samca, que consiste en una

instalación de 264 aerogeneradores de 250 MW cada uno (Blasco, A., 2021). Son aerogeneradores ya usados, y antiguos, pero se consigue continuar con beneficios económicos y generando energía mediante:

- Uso de las últimas actualizaciones de software
- Puesta a cero y adición de inspecciones adicionales
- Mantenimiento de la cadena de suministro de las máquinas que estén alcanzando su vida útil de diseño
- Equipo con experiencia operativa dentro del parque

### 5.3 Lubricantes para alargamiento de la vida útil

Los lubricantes son sistemas o sustancias que tienen como objeto disminuir el rozamiento entre piezas móviles para reducir su desgaste. Los materiales tradicionales provienen del petróleo. Las aplicaciones principales son: reducir la fricción y el desgaste, sellar elementos, refrigerar y controlar la limpieza de los motores. (Terradillos, J., Bilbao, M., Málaga, A., s.f.), (La revista energética de Chile, 2019).

Henry Pugh, gerente de Ingeteam en Chile afirma que, entre los beneficios del uso de lubricantes en aerogeneradores destaca la protección de los dientes de los engranajes y lograr que la temperatura de trabajo sea la adecuada y que pueda ser eficaz para todas las temperaturas del lugar donde se vaya a instalar. Afirma también que *“un 50% de las paradas no previstas son motivadas por una mala o inadecuada lubricación”*. El directivo hace énfasis en la necesidad y la relevancia del mantenimiento predictivo como fuente de información acerca del tipo de aceite que utilizará cada componente con el fin último de maximizar la vida útil del aceite dentro del aerogenerador (La revista energética de Chile, 2019), (Del Amo, P., 2021).

Según Cepsa, los principales elementos de una turbina eólica que necesitan lubricación son:

- Rodamiento y engranaje de cambio de paso de pala, expuesto a bajas temperaturas, altas cargas, vibraciones y movimientos oscilantes.
- Sistema hidráulico, en el que destacan, entre sus condiciones de funcionamiento, un amplio rango de temperaturas y humedad.
- Transformador, expuesto a bajas temperaturas y a humedad.
- Rodamiento del eje principal, entre cuyas condiciones de funcionamiento destacan: altas cargas, bajas velocidades, fuerzas axiales, vibraciones, movimientos oscilantes y humedad.

Paula Iria Tabernero Pazos

- Reductora de orientación y cambio de paso de pala (yaw & pitch control), expuesto a altas cargas, bajas velocidades, humedades y corrosión.
- Engranaje de la multiplicadora, con altas velocidades, vibraciones, movimientos oscilantes y humedad
- Rodamiento y engranaje, con bajas velocidades, altas cargas, vibraciones, impactos, humedad y movimientos oscilantes. Su función consiste principalmente en el giro lento, se desgastan las superficies y se reduce también la grasa entre ellas, lo que puede suponer en un fallo antes de lo previsto.

Tal como establece Cepsa, el 70% de los componentes de los aerogeneradores van engrasados o lubricados. Mediante la lubricación, lo que se consigue principalmente es evitar el desgaste y corrosión de los equipos, pero también funciona como vía de transporte de la suciedad hacia los filtros colectores, y como mecanismo de detección de las principales averías mecánicas (CEPSA, 2021).

En la Figura 31 se muestra la distribución de averías de un aerogenerador, siendo la parte presentada en color rojo la correspondiente a averías eléctricas (56%), y la parte presentada en azul oscuro las averías mecánicas (44%). Además, solo la multiplicadora y el sistema hidráulico suponen el 30% de las averías mecánicas.

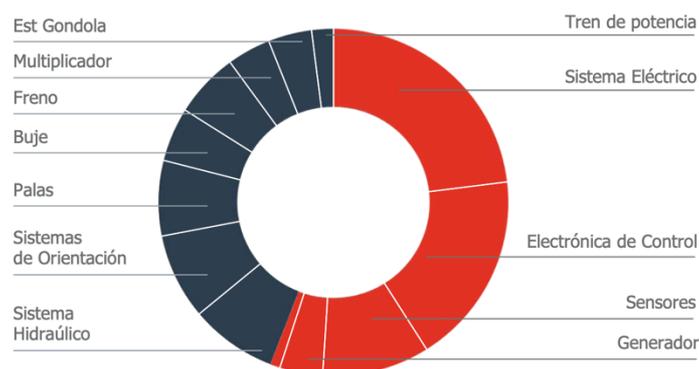


Figura 31. Distribución de las partes del aerogenerador más susceptibles de sufrir fallos (Fuente: Cepsa, 2021)

Desde Shell se plantea la importancia del uso de lubricantes en sistemas eólicos, para así reducir fricciones y desgastes e intentar aumentar la vida útil de las instalaciones. Tradicionalmente, los aceites lubricantes tendían a incorporar aditivos a extrema presión y azufre, pero lleva a incompatibilidades

Paula Iria Tabernero Pazos

---

con metales amarillos, por ejemplo el bronce, en el se puede observar presencia de cobre cinc y estaño.

En los aerogeneradores, prácticamente todas las aplicaciones están expuestas a cargas altas, lo que supone la minimización de la película de grasa, y pone en contacto directo las superficies metálicas, acelerando así el desgaste. Sufren también cargas de impacto en momentos como el arranque, la parada o durante períodos de rachas de viento, que minimizan también la película de grasa.

Existen empresas que invierten en investigación de lubricantes, que deben aumentar la resistencia a la oxidación y la homogeneidad del producto, manteniendo una baja viscosidad. Además, para su fabricación se deben utilizar productos sintéticos que permitan adaptar la viscosidad, deben controlar aspectos fisicoquímicos como la capacidad de producir espuma o liberar aire, que puede llegar a derivar en problemas en máquinas o paradas. Desde la empresa de lubricantes Shell, ya se ha incorporado una tecnología pionera, *gas to liquids*, en la que la principal innovación es el uso de gas natural como lubricante. En el caso de los lubricantes con gas, su vida útil puede llegar a conseguir hasta 10 años, mientras que los aceites tradicionales contaban con una extensión de entre 5 y 6 años (Del Amo, P., 2021).

Dentro de los retos de los lubricantes en el sector eólico destacan:

- Conseguir una excelente resistencia a la oxidación y degradación térmica, para que los rangos de cambio de los lubricantes oscilen sobre los 10 años
- Obtener una mejor protección frente al desgaste y a la corrosión, resultando en una mayor vida útil de los equipos
- Asegurar la facilidad para fluir a bajas temperaturas, que permitirá una mayor eficiencia y productividad durante el arranque
- Conseguir un control avanzado de la formación de espuma y excelente capacidad de filtrado, que repercutirá en menores costes de mantenimiento y menor riesgo de parada

## Capítulo 6. Reciclaje

Según directivos del sector eólico, como Gregorio Acero, director de Calidad y Medioambiente de Siemens Gamesa o Emmanuel García de la Peña Razquin, CEO y fundador de KoalaLifter, empresa dedicada al diseño de sistemas craneless (sin grúas) para el mantenimiento y construcción de aerogeneradores, entre el 80 y el 85% de los componentes del aerogenerador son reciclables ya que son materiales como acero, cobre u hormigón. Los materiales ferrosos se pueden reutilizar manteniendo casi todas sus propiedades mediante un proceso de fundición en hornos específicamente preparados y nueva consolidación en la forma que se precise.

El porcentaje restante está formado fundamentalmente por las palas, que están hechas de materiales compuestos, principalmente fibra de vidrio. Si bien es cierto que no son considerados residuos peligrosos y pueden almacenarse sin contaminar suelos en vertederos o espacios preparados para este fin, se presentan, principalmente en el norte de Europa, iniciativas para su reutilización en ámbitos separados de la producción de energía como la reutilización de las palas en elementos de obra urbanística como por ejemplo el que se muestra en la Figura 32, que consiste en una estación de bicicletas con la hecha con una pala de aerogenerador desmantelada, en Dinamarca, y también, proyecto en fase de planteamiento, un puente hecho de palas de aerogeneradores de 55m en Aalborg (EL MUNDO, 2021), (Vestas, 2021).



Figura 32. Pala de aerogenerador reciclada como cubierta para bicicletas en Dinamarca (Fuente: Ovacen, 2021)

Paula Iria Tabernero Pazos

---

A pesar de estas iniciativas, que se resumen en reciclaje, no es una solución definitiva para la cantidad de parques eólicos que se pretende dismantelar durante los próximos años – solo en Europa, 65 GW de capacidad terrestre alcanzará el final de su vida de diseño en 2028, según estudios planteados por Siemens Gamesa-.

Las palas son elementos muy susceptibles a las condiciones meteorológicas, por lo que son propensos a sufrir desperfectos debido a las condiciones meteorológicas a las que están expuestas, y los principales efectos o daños que sufren son grietas, defectos relativos a impactos de aves o rayos, y aperturas en el borde de ataque (Iberdrola, 2016).

Actualmente, las palas de los aerogeneradores están hechas de materiales compuestos, que permiten una ligera flexibilidad para adaptarse a las condiciones del viento, y cuyo peso se trata de que sea lo menor posible, lo que facilita tanto su transporte y montaje como el movimiento en situaciones en las que el viento es ligero. Los materiales con los que se hacen en este momento son principalmente poliéster o epoxi reforzado con fibra de vidrio. Como refuerzo también se utiliza fibra de carbono o kevlar.

Las palas están hechas por materiales compuestos (matriz y fibras) para obtener las características de peso y resistencia necesarios. La matriz es la parte que soporta las cargas de compresión, transfiere la carga de tracción a las fibras y evita la propagación de grietas en las fibras a lo largo de la pieza. Debe ser un material completamente estable químicamente, y no presentar incompatibilidades con la fibra. Esto es lo que hace de los materiales compuestos difíciles de reciclar, ya que se necesita fundir completamente la matriz (normalmente resina), y así poder separar las fibras intactas. Es un proceso viable, pero supone un sobre coste debido a la alta aportación de energía en forma de calor que requieren los hornos que permiten hacer el proceso (Vestas, 2021).

La fabricación de las palas se hace a través del siguiente proceso:

En primer lugar se fabrica la viga que está en la parte interna de la pala, que está hecha de un mezcla de materiales: fibra de vidrio y fibra de carbono impregnados con resina epoxi (polímero termoestable). A continuación, se fabrican las conchas, que son la parte externa de la pala y recubren las vigas. Están hechas de fibra de vidrio, y la cara que estará expuesta al exterior se cubre con una capa de pintura que ejerce de protección. Una vez están hechas las dos conchas, la siguiente fase consiste en hacer de estas dos y la viga

fabricada en pasos previos, una estructura conjunta. Es un proceso que se realiza en un horno y necesita un tiempo de curado para conseguir una única estructura firme. Cuando está hecho esto, se revisan los bordes de ataque y salida de la pala y pasa una inspección conjunta antes de salir del almacén para ser distribuida (*Iberdrola, 2016*).



*Figura 33. Palas de aerogeneradores en construcción (Fuente: La Razón, 2012)*

En España, según la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, y debido a la estabilidad química de los materiales de los que están hechas las palas, no son consideradas como un residuo peligroso (no contaminan los acuíferos ni zonas de agua y no son degradables por acción ambiental) y pueden retirarse y almacenarse una vez ha transcurrido su vida útil. No obstante, parte del objetivo de las energías renovables frente a las energías obtenidas mediante combustibles fósiles es conseguir no tener que utilizar terrenos como almacenaje y plantear una alternativa ambientalmente viable (*Vestas, 2021*).

Actualmente, las tecnologías derivadas del reciclaje de palas no están totalmente desarrolladas ya que no se desecha tanta cantidad como para que estas soluciones sean económicamente viables, pero se prevé que para 2050, haya, en forma de residuos, cerca de 300 toneladas referidas a eólica (*Vestas, 2021*). Sin embargo, para reciclar materiales compuestos existen tres procedimientos:

1. Procedimientos físicos: trituración para obtener polvo que se convierta en material de refuerzo para otros materiales

2. Procedimientos térmicos: principalmente pirólisis, que consiste en la degradación térmica de un material en ausencia de oxígeno, evitando así las reacciones de combustión (EL MUNDO, 2021).
3. Procedimientos químicos: cuyo objetivo es descomponer el polímero para obtener los monómeros de partida. A partir de estos monómeros se podría volver a formar otro material polimérico (Wind Europe, 2020).

#### **6.1.1 Procedimiento físico**

El comienzo de este procedimiento se lleva a cabo en el propio parque en el momento del desmantelado: la pala se corta una vez es retirada, facilitando así su transporte. Una vez en el almacén de tratamiento, se lleva a cabo la molienda y triturado de los materiales, a continuación su limpieza, y finalmente se obtiene polvo. Puede ser reestructurado para otros usos, pero tiene escaso valor estructural debido a sus propiedades.

#### **6.1.2 Procedimiento térmico**

Este procedimiento también se inicia en el parque eólico. Se cortan las palas y se transportan hasta el lugar de tratamiento. Una vez aquí, se reduce más su tamaño y se introduce en el horno de pirólisis. De este proceso se obtendrá la matriz fundida y las fibras listas para ser utilizadas de nuevo, aunque con menor resistencia que las fibras originales. Consiste en un proceso difícil y caro, por lo que los esfuerzos en esta técnica no resultan rentables para el sector: el grupo alemán Holcim lo puso en práctica, pero tuvo que rectificar ya que no era económicamente viable. Asimismo, en Dinamarca se intentó instaurar una práctica similar pero los materiales finales seguían sin tener las propiedades necesarias para las palas de aerogeneradores, y no tenían mercado suficiente debido al precio superior de los materiales a pesar de ser reciclados (Vestas, 2021).



Figura 34. Estado de una pala de aerogenerador después de su tratamiento (Fuente: Vestas, 2021)

Una de los métodos de reciclaje principales consiste en el reciclaje mecánico, que es un proceso de fragmentación y triturado de las palas y posterior separación de los materiales. Estos materiales se pueden utilizar en la fabricación de pavimentos, aislamientos u hormigón. Otra solución es la incorporación de los residuos de las palas en la construcción de cemento, algo favorable para el medio ambiente ya que puede llegar a reducir hasta en un 16% la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido durante el proceso de fabricación del cemento (Wind Europe, 2020).

En resumen, aunque tradicionalmente los materiales obtenidos del reciclaje de las palas de los aerogeneradores no pueden ser reutilizados en su misma forma, existen soluciones como su uso en ingeniería civil (por ejemplo aporte para la fabricación de cemento en Alemania debido a la prohibición de depositar materiales compuestos en sus vertederos, o asfaltos), o como materiales adicionales en arquitectura de elementos no estructurales (debido a la pérdida de propiedades debido a los tratamientos que se le realizan), aislamientos o pavimentos.

Como el objetivo final del sector eólico es continuar con la tendencia de economía circular, y poder reutilizar todos los componentes por los que están conformados los parques, se están desarrollando y planteando actualmente

Paula Iria Tabernero Pazos

---

tecnologías que lo permitan, como la tecnología pionera desarrollada por Siemens Gamesa, RecyclableBlade (Siemens Gamesa, 2021).

El 10 de septiembre de 2021, Siemens Gamesa ya anunciaba unas nuevas palas hechas de material totalmente reciclable que se instalarán en proyectos off shore gracias a la tecnología RecyclableBlade, que permite separar los componentes de la pala al fin de su vida útil y reciclarlos para posteriores usos. La compañía ya ha utilizado seis de estas palas en una instalación de Aalborg, en Dinamarca.

Si bien es cierto que el resto de los componentes de los aerogeneradores ya se podían reciclar (principalmente mediante la reutilización de los elementos ferrosos mediante fundición y reconstitución) las palas son el componente que más retos plantea para su reciclaje o reutilización debido a los materiales por los que está compuesto. Siemens Gamesa y RWE, empresa energética alemana, han firmado un acuerdo para monitorizar estas palas reciclables, que se espera que estén produciendo energía a partir del 2022.

Los materiales de los que están compuestas estas nuevas palas son una mezcla de materiales fundidos con resina, que conforman una estructura flexible, ligera y fuerte. La compañía ha anunciado que pretende que todos sus aerogeneradores estén formados mediante este tipo de tecnología para que, en 2040, todos sus elementos sean reciclables y conformar así una energía más limpia.

Tal como se ha expuesto, el 85 % de los materiales de los que están hechos los aerogeneradores actualmente instalados pueden ser reciclados, pero las palas de las turbinas suponen un reto ecológico, y en muchas ocasiones terminan siendo retiradas como desechos a terrenos en desuso en los que éstas se almacenan. Esta forma de desecho es similar a la que se plantea para otros tipos de energía no renovable, como por ejemplo la nuclear, y que tienen poca aceptación en el ámbito social y que pospone el reto hasta que los terrenos necesiten ser ocupados, o pasan a ser residuos, continuando con la línea de tendencia de la economía lineal.

En Europa, un 10% de los materiales hechos de fibra que pasan a ser residuos provienen de la industria eólica, y es por esto por lo que se han introducido prohibiciones del uso de este tipo de materiales, que terminan en vertederos. Según el número de aerogeneradores instalados sigue en auge, aparece la necesidad de una nueva tecnología que impacte en la menor medida posible a

Paula Iria Tabernero Pazos

---

la huella de carbono, conduciendo la energía eólica, en todas sus etapas, a una energía completamente limpia (Siemens Gamesa, 2021).

Existen proyectos cuyo objetivo es hacer de las palas un elemento reciclado más, aunque no hay ninguna técnica que actualmente tenga cabida en el mercado, bien por el sobrecoste que produce o bien porque no están consolidadas por completo.

El objetivo del proyecto de RecyclableBlades consiste en fabricar todas las partes de la pala con elementos como fibra de vidrio o de carbono, y un núcleo de madera o polietileno (PET), que se ensamble mediante una resina. Una vez termine la vida útil de la pala, se procederá a retirar la resina y reciclar o reutilizar los materiales. El proceso de fabricación se hará utilizando los métodos tradicionales, pero la principal diferencia está en el tipo resina, que permite separar las partes de manera eficaz para que el resto de materiales no se dañen y puedan ser reutilizados. Se hará de la siguiente forma:

- Desmantelamiento de las palas al final de su vida útil, separándolas de las turbinas
- Introducir las en una solución ácida que separe la resina del resto de materiales (fibras, madera, metales, plásticos...)
- Separación de los diferentes materiales y realización de tratamiento sobre ellos en caso de que lo necesiten después de haber estado en la solución
- Reutilización de los elementos para procesos que se adecúen a las propiedades de estos materiales.

Si bien es cierto que posiblemente no puedan ser reutilizadas de nuevo como componentes para palas de aerogeneradores debido a su pérdida de propiedades, son elementos cuyos componentes tienen cabida en otras aplicaciones industriales hasta que la tecnología esté completamente desarrollada y las palas instaladas sean totalmente reciclables, algo que se prevé que ocurra dentro de aproximadamente 30 años, que será el tiempo estimado en el que se proceda al desmantelamiento de los aerogeneradores ahora mismo instalados y que no son completamente reciclables.

## Capítulo 7. Impacto socioeconómico

Según Markus Tacke, CEO de Siemens Gamesa Renewable Energy, *“la energía eólica ha podido competir en costes con los combustibles fósiles gracias a los nuevos métodos de fabricación y a unos aerogeneradores más grandes, mejores y más eficientes.”* Miguel Arias Cañete, Comisario europeo de Acción por el Clima y Energía, establece que *“el sector eólico representa más de 300 000 empleos en la Unión Europea, una cifra que seguirá aumentando a medida que avanzamos hacia unas emisiones netas de gases de efecto invernadero nulas. A menudo se trata de trabajos de alta calidad, que contribuyen al empleo local en zonas rurales o desfavorecidas”*.

Actualmente, la demanda mundial de energía es cubierta en un 4% por energías renovables, pero se prevé que para 2040 pueda llegar a suponer un 34% de la demanda. Esto podría llegar a suponer alrededor del 23% de las reducciones de emisiones de carbono establecidas para 2050: 5600 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Acorde con este incremento de demanda, se invierte en tecnología para llegar a obtener estos resultados, consiguiendo que los costes de generación de energía eólica se hayan reducido en un 65% desde 1990 (KPMG, 2019).

Como ya se ha presentado con anterioridad en el proyecto, en el año 2020, un 23,8% de las patentes realizadas (OEPM, s.f.), corresponden a tecnología relativa a la eólica. REOLTEC, en 2020, realizó un estudio en el que los principales focos de innovación e investigación, relativos a eólica (terrestre), son: el rotor y las palas, multiplicadora y elementos de transmisión mecánica, control de turbina y parque y electrónica de potencia. Según este estudio, son estos cuatro elementos los que han permitido un aumento en las potencias y una mejor inserción de este tipo de energía en la red eléctrica.

- Rotor y palas, cuya principal innovación reside en los perfiles de las palas y en los perfiles eléctricos, estudios directamente relacionados con la producción de electricidad.
- Multiplicadora y elementos de transmisión mecánica, apartado en el que destaca la investigación en sistemas de transmisión directa, que permita reducir el número de etapas de la multiplicadora, consiguiendo así un sistema más eficaz.
- Control de las turbinas y parques, en la que la principal innovación reside en los sistemas de paso. En este apartado destaca la

Paula Iria Tabernero Pazos

incorporación de sensores de control, y se considera necesario debido a la importancia de aportar flexibilidad para permitir la operación de grandes rotores.

- Electrónica de potencia, en el que destaca la investigación en la tensión y las perturbaciones de la red derivadas de la transmisión de electricidad.

En cuanto a la contribución al PIB español, el sector eólico ha supuesto un 0,30% durante el año 2020. Si bien es cierto que se redujo respecto al 2019 un 12% debido a una menor actividad, la aportación asciende a 1778,5 millones de euros en cuanto a contribución directa (con base 2015) y 1327,9 millones de euros (con base 2015) en cuanto a contribución indirecta (Deloitte, 2020). En la Figura 34 se muestra la evolución del impacto del sector eólico al PIB en España desde el año 2005 hasta el 2020:

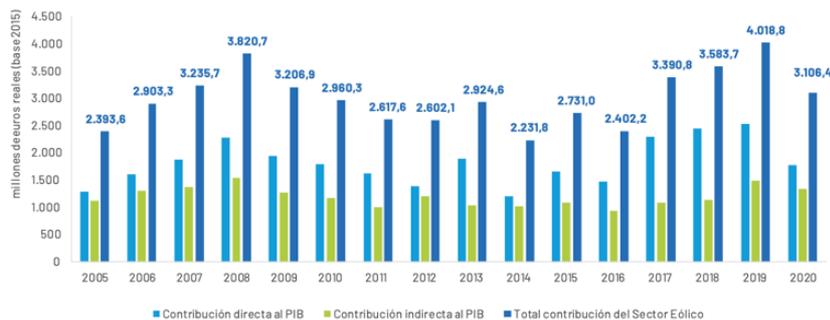


Figura 35. Evolución del impacto del sector eólico al PIB en España (Fuente: AEE, 2020)

Según el Centro Vasco para el Cambio Climático, y dado el crecimiento de esta rama de la industria durante los últimos años, la previsión de crecimiento en cuanto a inversión en eficiencia, en renovables, en red y electrificación, en otros aspectos, y los efectos de cambio de energía es el siguiente (KPMG, 2019).



Figura 36. Impacto en el PIB del sector eólico por áreas (Fuente: KPMG, 2019)

En cuanto a impacto en el empleo, según el Instituto Geográfico Nacional, las provincias más industrializadas de España son Madrid, Barcelona, Zaragoza y Navarra. También se centra gran parte de la actividad industrial española en las provincias del País Vasco, Valencia, Alicante y Sevilla. Si bien es cierto que no en todas ellas es posible instalar potencia eólica, debido a la escasez del recurso o de terreno, en las que sí es posible, dentro y fuera de este listado, supone una riqueza importante y ayuda a la aportación que da la provincia al PIB del país, así como a la creación de empleo (Asociación Empresarial Eólica, 2018).

La Asociación Empresarial Eólica ha planteado un estudio cuyo objetivo es hallar la estimación de empleos generados para un parque terrestre de 50MW. Se estima que la media de potencia de aerogeneradores en España es de 2,5 MW (El periódico de la energía, 2019), por lo que este planteamiento tendría aproximadamente 20 aerogeneradores.

Tal como se puede apreciar en la Figura 37, el tipo de personal necesario para cada etapa de la instalación va variando. En la primera fase, de diseño del proyecto y evaluación de recurso eólico, se necesita por una parte personal administrativo, y personas capaces de evaluar el terreno y los recursos, así como plantear la disposición y cualidades de los equipos a instalar. Para la parte de fabricación, hay empresas que son sus propios proveedores y otras que subcontratan para evitar estos costes. A partir de esta fase, se engloban las de transporte, construcción y conexiones y puesta en marcha, se generan hasta 35355 “días-hombre”, que se refiere a un profesional trabajando un día.

Paula Iria Taberero Pazos

La etapa de mantenimiento genera menor empleo como tal, debido a que es una fase en la que principalmente se precisa control y mantenimiento de todos los elementos. En caso de que hubiera problemas mayores problemas o hubiera que realizar grandes reparaciones, la contratación aumentaría. Finalmente, para la fase de desmantelamiento se vuelve a necesitar personal que planifique las operaciones y evalúe los terrenos, empresas que gestionen los residuos y personal que se encargue de desmontar todos los elementos del parque (Asociación Empresarial Eólica, 2018).

ESTIMACIÓN DEL EMPLEO GENERADO POR CADA TAREA DE LA CADENA DE VALOR DE UN PARQUE EÓLICO TERRESTRE TIPO DE 50 MW

Actividad de la cadena de valor	Tarea	Nº de empleos.día para un parque de 50 MW
1. Diseño del Proyecto y evaluación de recurso eólico	1.1. Selección de lugar para instalar el parque	290
	1.2. Estudios de factibilidad, de recurso eólico, impacto ambiental	210
	1.3. Desarrollo de proyecto: licencias, obtención de PPA's, financiación	1.780
	1.4. Diseño de ingeniería	300
2. Fabricación de equipos y componentes	2.1. Fabricación del nacelle	9.375
	2.2. Fabricación de las palas	4.565
	2.3. Fabricación de la torre	4.532
	2.4. Fabricación de los equipos de control y monitorización	495
3. Transporte	3.1. Transporte	875
4. Construcción del parque	4.1. Preparación del terreno y obra civil	16.600
	4.2. Instalación de las turbinas y torres	10.200
5. Conexión a red y puesta en marcha	5.1. Cableado y conexión a red	6.380
	5.2. Puesta en marcha	1.300
6. Operación y mantenimiento	6.1. Operación	1.770
	6.2. Mantenimiento	895
7. Desmantelamiento	7.1. Elaboración del plan de desmantelamiento	80
	7.2. Desmantelamiento	6.220
	7.3. Reciclaje o envío a vertedero de residuos	900
	7.4. Restauración del terreno	1.220
<b>Total</b>		<b>68.205</b>

Figura 37. Estimación del empleo generador por cada tarea de la construcción de un parque eólico terrestre de 50 MW (Fuente: AEE, 2018)

En total, contando con la contribución directa e indirecta, el empleo ascendió a un total de 27690 personas en el año 2020 tal como se muestra en la Figura 38.

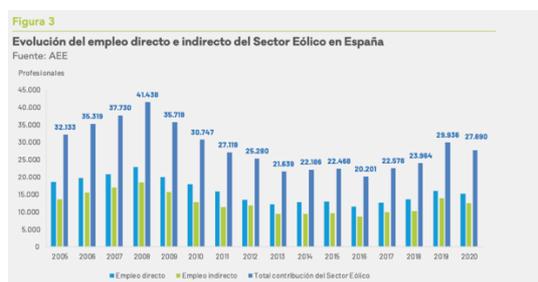


Figura 38. Evolución del empleo directo e indirecto del sector eólico en España (Fuente: AEE, 2020)

En lo referido a impacto social, la principal preocupación de los habitantes de pequeños pueblos, en los cuales se prevé hacer instalaciones eólicas en sus

Paula Iria Tabernero Pazos

---

proximidades, es la pérdida de su paisaje rural, que hace de estas zonas un atractivo turístico y genera así beneficios económicos.

Según plantean los habitantes de estos terrenos, la generación de energía es excesiva y el trabajo que generan no revierte directamente en las personas que viven en el rural. Afirman que los aerogeneradores son una amenaza de su forma de vida actual, basada en el turismo, agricultura y ganadería, en el que apuestan por la economía circular, según Javier Ciprés, ingeniero de telecomunicaciones y habitante de Matarraña en Teruel. Exponen que solamente el 3% de beneficio que generan los parques eólicos se queda en el territorio (2% en impuestos para el Ayuntamiento y 1% para el propietario). Por otra parte, hay quienes consideran las instalaciones eólicas como una “importante fuente de recursos para el territorio” (Chávarri, I. P., & Sierra, Á., 2021).

Como ejemplo de buenas prácticas respecto a instalaciones eólicas en zonas rurales, se presenta el caso del pueblo Wildpoldsried, en Alemania. Se trata de una zona en los Alpes, fronteriza con Suiza y Austria, en el cual sus habitantes decidieron apostar por la energía renovable como sustento económico. En ella, sus habitantes querían deshacerse de los medios de producción de energía tradicionales y reemplazarlos por turbinas eólicas, placas solares fotovoltaicas y sistemas de biomasa.

Según Susi Vogl, habitante de este pueblo, se empezó la instalación con 25 personas que invirtieron en una primera turbina. Unos años después, otras 50 personas invirtieron en otra turbina, y en 2016 otras 200 personas invirtieron en dos turbinas más. Ya en 2011, el pueblo producía tres veces más energía de la que consumía, y el resto lo vendían a la red nacional eléctrica. Susi Vogl afirma que, en total, se han invertido 40 millones de euros en todo el proyecto y el retorno de la inversión es de 5 millones de euros al año, debido a la venta de energía. En el año 2016 la aldea contaba con 11 turbinas eléctricas, 5 plantas de biogás y 2100 metros cuadrados de paneles solares fotovoltaicos, y 3 pequeñas plantas hidroeléctricas, lo que lo ha convertido en un ejemplo de autoabastecimiento energético (BBC, 2016).

Paula Iria Taberero Pazos

---



*Figura 39. Wilpoldsried (Fuente: BBC, 2016)*

## Capítulo 8. Inversión

Tal como se ha ido presentando a lo largo del proyecto, se deben hacer las estimaciones de cada parte de un proyecto de instalación de un parque eólico, desde el lugar fijado para el emplazamiento hasta el desmantelamiento y devolución del terreno a su estado original. En el desarrollo de este capítulo, se analizan varios parques eólicos con distintas capacidades. Los estudios sobre los que se basa este análisis están hechos por Atalaya Generación, Inver management, Sogepyme, Ger y Enerfín. Para cada parque, se muestra la situación de los aerogeneradores, y se ha optado por utilizar cuatro de las representaciones más comunes.

### 8.1 Parque eólico Arbequina (Zaragoza – Teruel)

Este estudio, hecho y aprobado en noviembre del 2020, presenta un parque eólico situado en las provincias de Zaragoza y Teruel. Consta de 12 aerogeneradores de 4,2 MW de potencia unitaria (Atalaya Generación, 2020). La situación exacta de los aerogeneradores en muestra en la Figura 40:

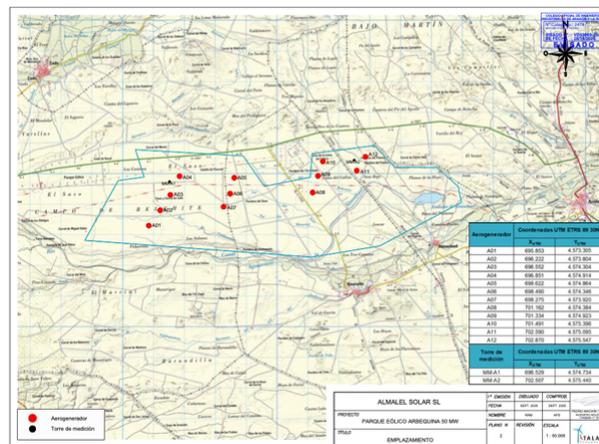


Figura 40. Plano topográfico de la situación de los aerogeneradores del parque eólico Arbequina (Fuente: Atalaya Generación, 2020)

### 8.2 Parque eólico Cascante II (Navarra)

En el informe complementario hecho por Inver management en julio de 2020, se presenta un parque eólico que se sitúa en el término municipal de Cascante, en Navarra. En él se han instalado 8 generadores de 5,7 MW y 4,5 MW de potencia unitaria, con un total de potencia instalada de 38,4 MW (Inver

management, 2020). Se presenta en la Figura 41 un mapa cartográfico con la distribución de los aerogeneradores:

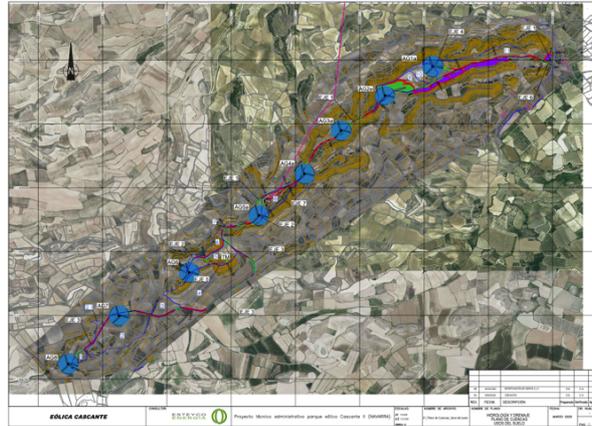


Figura 41. Plano topográfico de la situación de los aerogeneradores del parque eólico Cascante II (Fuente: Inver Management, 2020)

### 8.3 Parque eólico Ausejo – Ocón (La Rioja)

Este estudio está hecho por la empresa Ger en octubre de 2020, para un emplazamiento de 50 MW, con 10 aerogeneradores de potencia 5MW. La empresa promotora de esta instalación es IBERDROLA RENOVABLES LA RIOJA, S.A., y se encuentra en el término municipal de Ocón, en la Comunidad Autónoma de La Rioja, con una disposición de los aerogeneradores tal como se presenta en la Figura 42 (Ger, 2020):

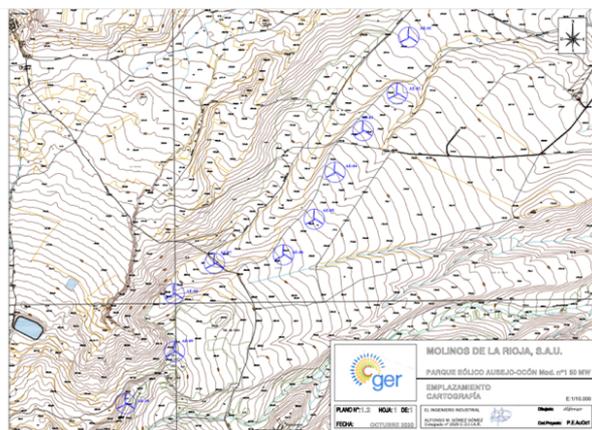


Figura 42. Plano topográfico de la situación de los aerogeneradores del parque eólico Ausejo - Ocón (Fuente: Ger, 2020)

#### 8.4 Parque eólico Tornajos (Almería)

El parque eólico Tornajos se encuentra en los términos municipales de Turrillas y Nijar, en la provincia de Almería. Está formado por 9 aerogeneradores de 5 MW cada uno, con una potencia total de 40 MW, incluyendo las pérdidas de potencia. El estudio del proyecto está hecho por SOGEPYME para Alfanar energía en junio de 2020 (SOGEPYME, 2020), y los aerogeneradores están dispuestos tal como se muestra en la Figura 43:

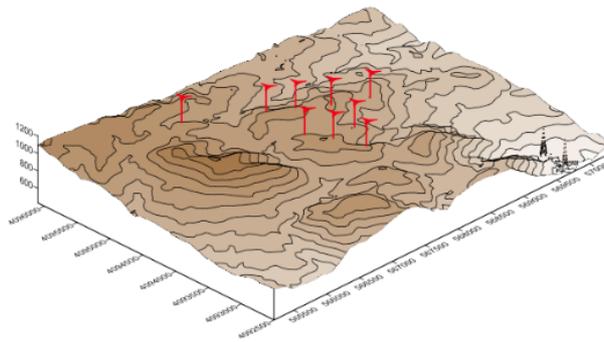


Figura 43. Plano topográfico de la situación de los aerogeneradores del parque eólico Tornajos (Fuente: SOGEPYME, 2020)

#### 8.5 Parque eólico Vollandín (Navarra)

Este estudio, hecho por Enerfín en abril de 2019, analiza el parque eólico “Vollandín”, situado en los términos municipales de Ablitas y Fontellas, en Navarra. La potencia total a instalar es 45,6 MW, en un total de 12 aerogeneradores (3,8 MW por aerogenerador) (Enerfín, 2019). La situación de los aerogeneradores se presenta en la Figura 44:

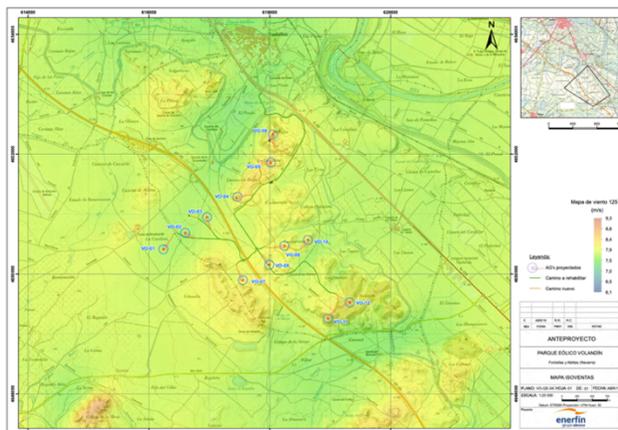


Figura 44. Plano topográfico de la situación de los aerogeneradores del parque eólico Volandín (Fuente: Enerfín, 2019)

CONCEPTO/ PARQUE	PARQUE ARBEQUINA	PARQUE CASCANTE II	PARQUE TORNAJOS	PARQUE AUSEJO-OCÓN	PARQUE VOLANDÍN
OBRA CIVIL	2.223.947 €	2.440.402 €	3.376.660 €	1.875.946 €	5.440.506 €
INFRAESTR. ELÉCTRICA	886.947 €	437.778 €	478.065 €	1.225.171 €	832.578 €
AEROGENERA DORES	24.000.000 €	24.304.549 €	22.500.000 €	28.625.500 €	34.656.000 €
SEGURIDAD Y SALUD	15.786 €	546.372 €	61.169 €	26.388 €	105.000 €
OTROS		135.913 €	201.534 €		
COSTE TOTAL	27.126.680 €	27.865.015 €	26.617.429 €	31.753.006 €	41.034.084 €

Tabla 1. Comparativa de presupuestos de cinco parques eólicos. (Fuente: elaboración propia, 2022)

Dentro de la categoría “otros”, se han incluido medidas compensatorias, gastos dedicados a ingeniería, tratamiento de vegetación y costes de control ya que en función de qué consultora realiza los estudios, los gastos se desglosan de una manera u otra. En el caso del parque “Volandín”, los gastos de control se excluyen del planteamiento de inversión general del parque. En el caso de la licencia de obras municipal, se calcula sobre el coste real y efectivo de la

Paula Iria Tabernero Pazos

construcción, instalación u obra de que se trate. Y sobre ese importe (que es la base imponible) se aplica el tipo impositivo (el que establezca cada ayuntamiento). La ley excluye de la base imponible una serie de conceptos, pues se considera que no son estrictamente costes de ejecución material, y que son el control de calidad, la gestión de residuos y los gastos de seguridad y salud. Por analogía, y homogeneidad, en el presente trabajo se ha optado por utilizar ese mismo criterio, y comparar los presupuestos refiriéndolos al coste real y efectivo de la construcción de la instalación.

Por tanto, el planteamiento queda reducido a 3 categorías fundamentales: obra civil, infraestructura eléctrica y aerogeneradores. Para los tres costes más determinantes del proyecto se ha hecho el cálculo para ver exactamente qué porcentaje tienen sobre el total.

CONCEPTO/ PARQUE	PARQUE ARBEQUINA	PARQUE CASCANTE II	PARQUE TORNAJOS	PARQUE AUSEJO-OCÓN	PARQUE VOLANDÍN
OBRA CIVIL	8%	9%	13%	6%	8%
INFRAESTR. ELÉCTRICA	3%	2%	2%	4%	3%
AEROGENERA DORES	88%	87%	85%	90%	88%

*Tabla 2. Costes en porcentajes de las categorías fundamentales de los parques eólicos (Fuente: elaboración propia, 2022)*

Según datos de la Asociación Empresarial Eólica, los costes de inversión de un parque eólico se pueden desglosar, de mayor a menor y tal como se muestra en el siguiente gráfico, tal como muestra la Figura 45:



Figura 45. Costes de inversión de un parque eólico (Fuente: AEE, 2021)

En los parques eólicos sobre los que se ha hecho el cálculo, a pesar de que los porcentajes fluctúen ligeramente, son acordes a los datos estimados.

Para hacer una estimación económica de los ingresos por megavatio de eólica instalado, se han analizado tres estudios de viabilidad: “Diseño de un parque eólico de 50 MW” (Noel Rodríguez, 2017), “Diseño de un parque eólico de 6 MW” (Bayón Gómez, Cebadera Miranda, & Del Castillo Gómez, 2009) y “Estudio de viabilidad de un parque eólico” (Moraleda Mendoza, 2013), y los ingresos anuales aproximados, para tiempos de operación de 20 años, son: 13.971.640,50 €, 1.512.344,13 € y 5.046.427,41€.

Es importante destacar que es fundamental conocer el precio unitario de venta del kWh para poder hallar este resultado. En los estudios planteados este valor está entre 0,048 y 0,078 euros el kWh.

Al comparar varias instalaciones de potencias muy dispares, se ha hecho la media del beneficio económico por MW, y el resultado final es: 136.869,41 euros al año por cada MW instalado.

<b>Estudio / beneficios</b>	<b>Diseño de un parque eólico de 50 MW</b>	<b>Diseño de un parque eólico de 6 MW</b>	<b>Estudio de viabilidad de un parque eólico</b>
<b>Beneficio anual</b>	13.971.640,50 €	1.512.344,13 €	5.046.427,41 €
<b>Beneficio anual por MW</b>	279.432,81 €	30.246,88 €	100.928,55 €

**Beneficio anual medio por MW: 136.869,41 €**

*Tabla 3. Beneficio de cada MW de eólica instalado. (Fuente: elaboración propia, 2022)*

En resumen, este tipo de proyectos energéticos resultan rentables para las personas propietarias, lo que los convierte en vectores para la consecución de los objetivos nacionales para avanzar hacia un futuro próximo con menos emisiones y con menor dependencia de combustibles fósiles.

## Capítulo 9. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Con este proyecto se pretendía analizar la capacidad de alargamiento de la vida de un aerogenerador, con el fin de poder extender la vida útil de los parques eólicos. Los resultados obtenidos permiten afirmar que, gracias a los esfuerzos que se realizan en este sector, en cuanto a innovación en nuevos materiales y procesos, la extensión de la vida de los elementos es un proceso viable y que se está comenzando a poner en práctica.

En cuanto a la posibilidad de conseguir minimizar los impactos ambientales, en un marco temporal a corto plazo, existen alternativas gracias a las inversiones de empresas pioneras en el mercado que centran sus objetivos en conseguir que todos los elementos utilizados para este tipo de explotaciones sean 100% reciclables. Además, se ha reflejado a lo largo del proyecto la capacidad que tienen los parques eólicos de alargar su vida útil de diseño utilizando técnicas de mantenimiento predictivo y lubricantes para facilitar la conservación de los diferentes elementos.

Si bien es cierto que la vida útil que se estima para un aerogenerador de tamaño medio es alrededor de 20 años, invirtiendo en conservarlos y realizando inspecciones que permitan adelantarse al fallo, se estima que pueda alargarse, como mínimo, 10 años más.

La energía eólica es una de las energías renovables más puntera en el sector de producción energética, y por ello se realizan grandes investigaciones e innovaciones en él. A pesar de que quedan retos por afrontar, como puede ser el efecto que tiene sobre las poblaciones cercanas a las instalaciones, mitigación del impacto ambiental, o la mitigación de ondas electromagnéticas que puedan interferir en otros sistemas, el planteamiento actual es viable social, medioambiental y económicamente. En lo referido a sostenibilidad, se puede afirmar que este tipo de instalación energética es de las que más se ajusta a cumplir con las tres ramas: medioambiental, a pesar de que quedan retos por afrontar, se evitan millones de toneladas de gases perjudiciales para los seres vivos, evita la extracción de materiales radiactivos y la complicada gestión de los residuos generados, y se asegura la existencia del recurso.

En cuanto a la sostenibilidad social, es la parte de las instalaciones que mayor problemática podría suponer, y es por esto por lo que se propone establecer un plan a nivel nacional en el que se expongan las razones de elección del emplazamiento, el destino final de la energía y de los componentes, y la cesión de parte de la energía o beneficios a los propietarios de las tierras en caso de que sean utilizadas para este fin. De esta manera se potencia la cesión de terrenos para este tipo de instalaciones, y puede aumentar el interés de plantear pequeñas instalaciones de autoabastecimiento que permitan una menor dependencia de particulares a la red energética. Para mitigar los impactos relativos a los residuos, las alternativas actuales de repotenciación y énfasis en el mantenimiento con el fin de prolongar la vida útil de los aerogeneradores abren la vía a la posibilidad de minimizar notablemente la cantidad de desperdicios que deja esta rama de la industria. Ahora que la tecnología ya está desarrollada, el objetivo debería ser la instalación del mayor número de aerogeneradores con el 100% de sus componentes fácilmente reciclables para seguir avanzando hacia convertirla en una energía más verde.

Dado que normalmente hay picos sobreproducción de energía procedente de los parques, una alternativa para el uso de este sobrante sería el hidrógeno, en este momento en fase de planteamiento, es la propulsión de vehículos mediante hidrógeno cuando haya sobreproducción de energía. Este proceso consiste en utilizar la electricidad sobrante para hacer electrolisis de agua, que la descompone en hidrógeno y oxígeno. Este se libera a la atmósfera, y el hidrógeno se comprime y almacena licuado, como el propano o el butano, para utilizarlo como combustible o en otras aplicaciones industriales.

## REFERENCIAS

- AEE. (2018). *Estudio macroeconómico del impacto del sector eólico en España*.  
[https://www.aeeolica.org/images/Publicaciones/AEE\\_Estudio\\_Macroeconomico-2018.pdf](https://www.aeeolica.org/images/Publicaciones/AEE_Estudio_Macroeconomico-2018.pdf) [Citado el: 7 de diciembre de 2021]
- AEE. (2020). *Potencia Instalada y Generación. La Eólica en España*:  
<https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/potencia-instalada-y-generacion/>  
[Citado el: 21 de diciembre de 2021]
- AEE. (2021). *La eólica y el precio de la luz. Asociación Empresarial Eólica (AEE)*: <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-y-el-precio-de-la-luz/>  
[Citado el: 2 de enero de 2022]
- Álvarez Rato, A. (2 de julio de 2021). *Plan de restauración y desmantelamiento del parque eólico "Pico Liebres"*. <https://docplayer.es/44255513-Plan-de-restauracion-y-desmantelamiento-del-parque-eolico-pico-liebres.html>  
[Citado el: 13 de diciembre de 2021]
- Arenal, C., Ceña, A., Morante, M., Romagosa, T., & Willstedt, H. (junio de 2021). Anuario Eólico 2021. La voz del Sector. Asociación Empresarial Eólica (AEE): <https://aeeolica.org/wp-content/uploads/2021/06/AF-ANUARIO-AEE-2021-web.pdf> [Citado el: 5 de diciembre de 2021]
- Asiain, J. (2021). *Machinery Maintenance. Module 1 – Maintenance Techniques*. Universidad Europea [Citado el: 17 de diciembre de 2021]
- Asociación Empresarial Eólica. (enero de 2019). *INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD EN EMPLAZAMIENTOS EXISTENTES E IMPULSO DE LA ACTIVIDAD INDUSTRIAL*. [Citado el: 18 de diciembre de 2021]
- Atalaya Generación. (octubre de 2020). *Proyecto parque eólico Arbequina 50 MW*.  
[https://www.aragon.es/documents/20127/82982846/02.7\\_ARB\\_Separata\\_REE.pdf/86fe14b8-cf47-9010-4c6f-57b216bff7b5?t=1614601506746](https://www.aragon.es/documents/20127/82982846/02.7_ARB_Separata_REE.pdf/86fe14b8-cf47-9010-4c6f-57b216bff7b5?t=1614601506746)  
[Citado el: 13 de enero de 2022]
- Bayón Gómez, R., Cebadera Miranda, L., & Del Castillo Gómez, R. (Enero de 2009). *Diseño de un parque eólico de 6 MW en Malpica de Bergantiños*,

*La Coruña*. EOI - Escuela de Negocios: Diseño de un parque eólico de 6 MW [Citado el: 10 de diciembre de 2021]

BBC (diciembre de 2016). *Wildpoldsried, la aldea alemana que se convirtió en el paraíso de la sustentabilidad*. Foro Ambiental. <https://www.foroambiental.net/archivo/noticias-ambientales/energias-y-tecnologia/1851-wildpoldsried-el-visionario-pueblo-que-produce-5-veces-mas-energia-de-la-que-necesita-y-vende-el-resto> [Citado el: 8 de diciembre de 2022]

Blasco, A. (diciembre de 2021). *Life Extension. The future is now*. Feria Internacional de Mantenimiento de Energías Renovables, Zaragoza, España. [Citado el: 20 de diciembre de 2021]

BOE. (21 de marzo de 2011) - BOE-A-2011-7842 Ley 9/2011, de 21 de marzo, por la que se crean el canon eólico y el Fondo para el Desarrollo Tecnológico de las Energías Renovables y el Uso Racional de la Energía en Castilla-La Mancha.(2011). Boletín Oficial del Estado. [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-7842](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-7842) [Citado el: 28 de noviembre de 2021]

BOE. (diciembre de 2013). Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental Boletín Oficial del Estado. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-12913-consolidado.pdf> [Citado el: 10 de diciembre de 2021]

BOE. (febrero de 2021) <https://www.boe.es/buscar/pdf/2010/BOE-A-2010-1708-consolidado.pdf>. [Citado el: 11 de diciembre de 2021]

CEPSA. (2021). Lubricantes enfocados a aerogeneración. [https://www.cepsa.es/stfls/comercial/FICHEROS/Cepsa\\_Lubricantes\\_Aerogeneracion.pdf](https://www.cepsa.es/stfls/comercial/FICHEROS/Cepsa_Lubricantes_Aerogeneracion.pdf) [Citado el: 22 de diciembre de 2021]

Chávarri, I. P., & Sierra, Á. (27 septiembre de 2021). *En mi pueblo, «no»: por qué la España vaciada se opone a los megaproyectos*. El Confidencial. [https://www.elconfidencial.com/espana/2021-09-26/pueblo-espana-vaciada-megaproyectos\\_3295986/](https://www.elconfidencial.com/espana/2021-09-26/pueblo-espana-vaciada-megaproyectos_3295986/) [Citado el: 8 de diciembre de 2022]

Cobreiro, P. Jiménez, N. (2014). *Aerogeneradores (I): funcionamiento y marco normativo de prevención de riesgos laborales*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. <https://www.aeeolica.org/uploads/documents/10170-aerogeneradores-i>

Paula Iria Tabernero Pazos

---

funcionamiento-y-marco-normativo-de-prevencirn-de-riesgos-laborales.pdf [Citado el: 9 de noviembre de 2021]

Contreras, R., Mateo, A. (septiembre de 2006). *Mantenimiento de parques eólicos*. Global Energy Services. [https://www.aeeolica.org/uploads/documents/pe06/PE06\\_6\\_2\\_Antonio\\_Mateo.pdf](https://www.aeeolica.org/uploads/documents/pe06/PE06_6_2_Antonio_Mateo.pdf) [Citado el: 17 de noviembre de 2021]

Cruz, I. (2011). *La energía eólica de media potencia. Conceptos generales y ejemplos de aplicaciones*. Asociación Empresarial Eólica. [https://www.aeeolica.org/uploads/documents/Ignacio\\_Cruz\\_La\\_energa\\_eolica\\_de\\_media\\_potencia.pdf](https://www.aeeolica.org/uploads/documents/Ignacio_Cruz_La_energa_eolica_de_media_potencia.pdf) [Citado el: 9 de noviembre de 2021]

Del Amo, P. (diciembre de 2021). *Alargamiento de vida útil de los lubricantes en el sector eólico*. Feria Internacional de Mantenimiento de Energías Renovables, Zaragoza, España. [Citado el: 20 de diciembre de 2021]

Deloitte. (2020). *Estudio macroeconómico del impacto del sector eólico en España*. [https://aeeolica.org/wp-content/uploads/2021/12/Estudio\\_Macroeconomico\\_2021\\_AEE.pdf](https://aeeolica.org/wp-content/uploads/2021/12/Estudio_Macroeconomico_2021_AEE.pdf) [Citado el: 16 de enero de 2022]

Eduardo Martínez, Sanz, Pellegrini, Jiménez, Blanco (enero de 2009) *Life-cycle assessment of a 2MW rated power wind turbine: CML method*. ResearchGate. [Citado el: 15 de enero de 2022]

EL MUNDO. (25 noviembre de 2021). *Así se «jubilan» las renovables más antiguas: reciclaje, incineración... o vertedero*. <https://www.elmundo.es/ciencia-y-salud/medio-ambiente/2021/11/25/6155c453fc6c83136b8b45ae.html> [Citado el: 27 de diciembre de 2021]

El periódico de la energía. (2019). *Así es la carrera por fabricar el aerogenerador 'onshore' más grande del mundo*. <https://elperiodicodelaenergia.com/asi-es-la-carrera-por-fabricar-el-aerogenerador-onshore-mas-grande-del-mundo/> [Citado el: 29 de diciembre de 2021]

Enerfín. (abril de 2019). *Anteproyecto parque eólico Vollandín*. [Citado el: 14 de enero de 2022]

Paula Iria Tabernero Pazos

---

Enerfín. (noviembre de 2020). *PARQUE EÓLICO SANTA ÁGUEDA Y SU LÍNEA DE EVACUACIÓN*. [https://gobiernoabierto.navarra.es/sites/default/files/6.\\_eia.\\_anexo\\_vii\\_documento\\_de\\_sintesis\\_pe\\_santa\\_agueda.pdf](https://gobiernoabierto.navarra.es/sites/default/files/6._eia._anexo_vii_documento_de_sintesis_pe_santa_agueda.pdf) [Citado el: 10 de enero de 2022]

Energy Professional Symposium. (2015). Aerogeneradores y cimentaciones. <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=36674> [Citado el: 10 de diciembre de 2021]

ER. (26 de julio de 2013). *El superordenador más potente de España está desarrollando el simulador eólico del futuro*. *Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias*. <https://www.energias-renovables.com/eolica/la-simulacion-eolica-da-un-paso-mas-20130726> [Citado el: 13 de diciembre de 2021]

Escuela de Empresa. (septiembre de 2019). Unidad 3. Introducción a la gestión de residuos. [https://escueladeempresa.com/cursos-universitarios-3-meses/medioambiente/curso-en-gestion-de-residuos-industriales/?gclid=CjwKCAiA866PBhAYEiwANKInePUpRbVFydOiQy4hNSEBiF6ttSbdQMREKrXrZhBh3kFfJab6y3dGdhoCbiYQAvD\\_BwE](https://escueladeempresa.com/cursos-universitarios-3-meses/medioambiente/curso-en-gestion-de-residuos-industriales/?gclid=CjwKCAiA866PBhAYEiwANKInePUpRbVFydOiQy4hNSEBiF6ttSbdQMREKrXrZhBh3kFfJab6y3dGdhoCbiYQAvD_BwE) [Citado el: 10 de noviembre de 2021]

Espacios Naturales Protegidos. (julio de 2021). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. [https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ENP\\_Descargas.aspx#prettyPhoto%5Bpp\\_gal%5D/0/](https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ENP_Descargas.aspx#prettyPhoto%5Bpp_gal%5D/0/) [Citado el: 1 de diciembre de 2021]

EXPOFIMER. (diciembre de 2021). *La calidad en el mantenimiento, clave en la sostenibilidad de las instalaciones renovables, las condiciones de trabajo y los servicios de valor añadido*. Feria Internacional de Mantenimiento de Energías Renovables, Zaragoza, España. [Citado el: 16 de diciembre de 2021]

Friol, C. (29 junio de 2021). *¿Por qué no se están repotenciando los parques eólicos en Galicia?* *Campo Galego*. <https://www.campogalego.es/porque-no-se-estan-repotenciando-los-parques-eolicos-en-galicia/> [Citado el: 19 de diciembre de 2021]

Paula Iria Tabernero Pazos

---

Galián, A. (septiembre de 2016). *Evolución de las instalaciones de energía eólica en España. Actualidad y perspectivas de futuro*. Universidad de Jaén.

[http://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/4641/1/TFG\\_Galián\\_Sánchez\\_Antonio.pdf](http://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/4641/1/TFG_Galián_Sánchez_Antonio.pdf) [Citado el: 27 de noviembre de 2021]

Ger. (octubre de 2020). *Proyecto del parque eólico Ausejo - Ocón*. [Citado el: 14 de enero de 2022]

Greenalia. (marzo de 2021). *Plan estratégico de estimaciones de los impactos socio - económicos de un parque eólico*. [Citado el: 3 de enero de 2022]

Iberdrola. (2016). *Qué es un aerogenerador y cómo funciona*. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores> [Citado el: 13 de noviembre de 2021]

IBRD. Environment Department. (1991). *Environmental assessment sourcebook. Volume III. Guidelines for environmental assessment of energy and industry projects*. [Citado el: 9 de enero de 2022]

IDAE. (2011). Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. *Análisis del recurso. Atlas eólico de España*. [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_e4\\_atlas\\_eolico\\_A\\_9b90ff10.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e4_atlas_eolico_A_9b90ff10.pdf) [Citado el: 21 de noviembre de 2021]

IDAE. (2020). *Preguntas frecuentes etiquetado para consumidores de aerogeneradores de pequeña potencia*. <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/eolica/eolica-de-pequena-potencia/etiquetado-para/FAQs-y-definiciones> [Citado el: 9 de enero de 2022]

IDAE. (septiembre de 2006). Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. *Energía Eólica*. <https://www.idae.es> [Citado el: 10 de noviembre de 2021]

IEA. (2021). *Improved policies and COP26 climate goals are set to propel renewable electricity growth to new heights*. Executive summary. Renewables 2021: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021/executive-summary> [Citado el: 2 de enero de 2022]

INSST. (2014). *Aerogeneradores (I): funcionamiento y marco normativo de prevención de riesgos laborales*.

Paula Iria Tabernero Pazos

---

<https://www.aeeolica.org/uploads/documents/10170-aerogeneradores-i-funcionamiento-y-marco-normativo-de-prevencirn-de-riesgos-laborales.pdf> [Citado el: 8 de diciembre de 2021]

Inver management. (julio de 2020). Informe Complementario a Proyecto Técnico Administrativo Parque Eólico Cascante II. [https://gobiernoabierto.navarra.es/sites/default/files/2.\\_proyecto\\_pe\\_cascante\\_ii.pdf](https://gobiernoabierto.navarra.es/sites/default/files/2._proyecto_pe_cascante_ii.pdf) [Citado el: 22 de noviembre de 2021]

ISO. (2006). International Normalization for Standardization. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es> [Citado el: 12 de enero de 2022]

Kats, A. L.: «Stratospheric and mesospheric circulation». Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, 1970; E . N . Lorenz: «The nature and theory of the general circulation of the atmosphere». W. M. O., 1967; E . Palmen, C. W. Newton: «Atmos- pheric circulation systems». Academic Press, 1969; S. Petterssen: «Intro- duction to meteorology» 3." edición. Me. Graw Hill book Company, 1969. [Citado el: 28 de diciembre de 2021]

KMPG. (Octubre de 2019). Los efectos socioeconómicos de la energía eólica en el contexto de la transición energética. Estudio de KPMG a petición de Siemens Gamesa: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/-/media/siemensgamesa/downloads/es/explore/informe-del-impacto-socioeconomico-eolico-2019.pdf> [Citado el: 28 de noviembre de 2021]

La Razón. (septiembre de 2012). Los secretos de una pala gigante [https://www.larazon.es/historico/8363-los-secretos-de-una-pala-gigante-GLLA\\_RAZON\\_500685/](https://www.larazon.es/historico/8363-los-secretos-de-una-pala-gigante-GLLA_RAZON_500685/) [Citado el: 4 de enero de 2022]

La revista energética de Chile. (2019). Cómo la lubricación de aerogeneradores favorece la generación eólica. Electricidad. <https://www.revistaei.cl/2019/02/06/la-lubricacion-aerogeneradores-favorece-la-generacion-eolica/#> [Citado el: 12 de enero de 2022]

Lexnavarra.(s.f.).LexNavarra.

<http://www.lexnavarra.navarra.es/detalle.asp?r=28521> [Citado el: 17 de noviembre de 2021]

MED WIND ENERGY SL. (Septiembre de 2020). *Parque Eólico Arriello II* (Términos municipales de Castellfort, Villafranca del Cid y Ares del Maestre). Memoria del plan de desmantelamiento y restitución:

Paula Iria Tabernero Pazos

---

[https://cindi.gva.es/documents/161328209/174076643/7.1.Plan+de+desmantelamiento\\_PEARriello1/5cde1380-bbb7-4277-beb6-a88a5ae74894](https://cindi.gva.es/documents/161328209/174076643/7.1.Plan+de+desmantelamiento_PEARriello1/5cde1380-bbb7-4277-beb6-a88a5ae74894)  
[Citado el: 17 de diciembre de 2021]

MITECO. (1989). *Guía metodológica para la elaboración de estudio de impacto ambiental de la dirección general de medio ambiente* (Ministerio de Medio Ambiente). [Citado el: 9 de enero de 2022]

MITECO. (20 de octubre de 2021). *El MITECO lanza una nueva subasta de renovables para reducir la factura eléctrica y facilitar la acción climática. Transición Ecológica y el Reto Demográfico*: <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transicion-ecologica/Paginas/2021/201021-subasta-renovables.aspx> [Citado el: 6 de diciembre de 2021]

MITECO. (2021). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/> [Citado el: 14 de diciembre de 2021]

MITECO. (diciembre de 2020). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Evaluación de impacto ambiental de proyectos de parques eólicos terrestres*. [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/red-de-autoridades-ambientales-raa-/tratamientoimpactosparqueeolicograafinal\\_tcm30-523228.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/red-de-autoridades-ambientales-raa-/tratamientoimpactosparqueeolicograafinal_tcm30-523228.pdf) [Citado el: 9 de enero de 2022]

MITECO. (diciembre de 2020). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Alcance de estudio de impacto ambiental de proyecto de parque eólico terrestre*. [Citado el: 1 de diciembre de 2021]

MITECO. (julio de 2021). Espacios Naturales Protegidos. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. [https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ENP\\_Descargas.aspx#prettyPhoto%5Bpp\\_gal%5D/0/](https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ENP_Descargas.aspx#prettyPhoto%5Bpp_gal%5D/0/) [Citado el: 19 de diciembre de 2021]

Monge Gutiérrez, J.J. (2018). Universidad Rey Juan Carlos. *Tema 6: Energía Eólica*. [Citado el: 15 de noviembre de 2021]

Moraleda Mendoza, J. (16 de Septiembre de 2013). *Estudio de viabilidad de un parque eólico*. Máster en Energías Renovables. Universidad Politécnica

- de Cartagena:  
<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/3773/tfm290.pdf>  
[Citado el: 20 de diciembre de 2021]
- Morales, M. I. (2021). *Análisis de procesos: aspectos e impactos ambientales*. Calidad y Gestión Medioambiental. Apuntes de Asignatura de La Universidad Europea de Madrid. [Citado el: 8 de diciembre de 2021]
- Munguía, I. (16 septiembre de 2009). *¿Cuánta potencia desarrolla un aerogenerador? (y II)*. Xataka Ciencia. <https://www.xatakaciencia.com/energia/cuanta-potencia-desarrolla-un-aerogenerador-y-ii> [Citado el: 21 de noviembre de 2021]
- Naturgy. (Junio de 2019). *Proyecto del parque eólico Merengue II, de la planta solar fotovoltaica Puerta del Jerte y de la Infraestructura de evacuación asociada* (Plasencia, Cáceres). Anexo XII: Plan de desmantelamiento: [http://industriaextremadura.juntaex.es/kamino/attachments/article/14017/Anexo\\_XII\\_Plan\\_Desmantelamiento.pdf](http://industriaextremadura.juntaex.es/kamino/attachments/article/14017/Anexo_XII_Plan_Desmantelamiento.pdf) [Citado el: 10 de enero de 2022]
- Naturiker. (noviembre de 2020). Documento síntesis: *Estudio de impacto ambiental del parque eólico «Azazeta» e infraestructuras asociadas*. [Citado el: 14 de enero de 2022]
- Noel Rodríguez, R. (2017). *Diseño de un Parque Eólico de 50 MW*. Proyecto Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla:  
[https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/65452/TFG\\_Ra%FAI%20Noel%20Rodr%EDguez.pdf;jsessionid=0F0A37810C08E704610501AD10086D28?sequence=1&isAllowed=y](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/65452/TFG_Ra%FAI%20Noel%20Rodr%EDguez.pdf;jsessionid=0F0A37810C08E704610501AD10086D28?sequence=1&isAllowed=y) [Citado el: 7 de diciembre de 2021]
- OEPM. (s.f.). Oficina Española de Patentes y Marcas. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. <http://www.oepm.es/es/index.html> [Citado el: 12 de enero de 2022]
- Ovacen (2021). De palas de un generador eólico a proteger bicicletas. <https://ovacen.com/pala-aerogenerador/> [Citado el: 12 de diciembre de 2021]
- Ramos, M. (junio de 2019). *Diseño y análisis económico financiero de una instalación eólica onshore de 99 MW en el mercado rumano y norteamericano*. UPM

Paula Iria Tabernero Pazos

---

[https://oa.upm.es/42996/1/PFC\\_Miguel\\_Ramos\\_Rodriguez.pdf](https://oa.upm.es/42996/1/PFC_Miguel_Ramos_Rodriguez.pdf) [Citado el: 21 de diciembre de 2021]

REE. (16 de Diciembre de 2021). *La eólica se convierte en la principal fuente de generación de energía eléctrica en España en 2021*. Sala de Prensa: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2021/12/la-eolica-se-convierte-en-la-principal-fuente-de-generacion-de-energia-electrica-en-espana-en-2021> [Citado el: 3 de diciembre de 2021]

Repsol. (2021). Economía circular y Sostenibilidad: <https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/economia-circular/index.cshtml> [Citado el: 21 de noviembre de 2021]

Richard, C. (15 de diciembre de 2021). *Vestas targets fully recyclable wind turbine blades by 2030*. Windpower Monthly. <https://www.windpowermonthly.com/article/1730203/vestas-targets-fully-recyclable-wind-turbine-blades-2030> [Citado el: 11 de enero de 2022]

Siemens Gamesa. (septiembre de 2021). *Siemens Gamesa pioneers wind circularity: launch of world's first recyclable wind turbine blade for commercial use offshore*. <https://www.siemensgamesa.com/newsroom/2021/09/launch-world-first-recyclable-wind-turbine-blade> [Citado el: 16 de diciembre de 2021]

SOGEPYME. (junio de 2020). *Proyecto del parque eólico Tornajos*. [Citado el: 14 de enero de 2022]

Terradillos, J., Bilbao, M., Málaga, A. (s.f.). *Lubricación y mantenimiento de motores de gas. lubrication management*. IK4 - TEKNIKER. [https://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/Lubricación\\_motores\\_gas\\_ES.pdf](https://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/Lubricación_motores_gas_ES.pdf) [Citado el: 12 de enero de 2022]

Tobías Salas C., Rubio Jiménez, A. (2017). *Estado del arte de aerogeneradores de eje horizontal y vertical*. Jóvenes en la ciencia. [Citado el: 20 de noviembre de 2021]

UDC (febrero de 2019). *Eólica marina*. <https://www.catedracosmealvarez.com/un-nuevo-parque-eolico-marino-en-alemania/> [Citado el: 16 de diciembre de 2021]

Paula Iria Tabernero Pazos

---

UM. Tema 7. (s.f.). Circulación General Atmosférica. <https://www.um.es/geograf/clima/tema07.pdf> [Citado el: 19 de diciembre de 2021]

United Nations. (2015, September 25). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Resolution Adopted by the General Assembly: <https://undocs.org/en/A/RES/70/1> [Citado el: 9 de diciembre de 2021]

Universidad de Cantabria (enero de 2018). *Análisis de viabilidad socio - económica de un parque eólico offshore en Cantabria* <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12848/404761.pdf?sequence=1> [Citado el: 30 de noviembre de 2021]

Vasco, G. J. E. (s.f.). *Circulaciones de escala Meso - Aire - Euskadi.eus*. Basque Administration Web Portal. [https://www.euskadi.eus/web01-a2ingair/es/contenidos/informacion/com\\_escala\\_meso/es\\_7756/es\\_escala.html](https://www.euskadi.eus/web01-a2ingair/es/contenidos/informacion/com_escala_meso/es_7756/es_escala.html) [Citado el: 8 de enero de 2022]

Vestas. (2021). *Reciclaje de palas, un nuevo reto para la industria eólica*. Asociación Empresarial Eólica [https://www.aeeolica.org/images/2021/WebinarsEolicos/Webinar-AEE\\_reciclado\\_palas.pdf](https://www.aeeolica.org/images/2021/WebinarsEolicos/Webinar-AEE_reciclado_palas.pdf). [Citado el: 13 de enero de 2022]

WAsP. (s.f.). WAsP. <https://www.wasp.dk> [Citado el: 12 de enero de 2022]

Wind Europe. (Noviembre de 2020). *Decommissioning of Onshore Wind Turbines*. Obtenido de *Industry Guidance Document*: [https://proceedings.windeurope.org/biplatform/rails/active\\_storage/disk/eYJfcmFpbHMiOnsibWVzc2FnZSI6IkJBaDdDRG9JYTJWNVNTSWhZV0Z4Y0RCM2F6SmxZMnRvYzI4NGFHUXdjWFZrYkdWd00yeDJid1k2QmtWVU9oQmthWE53YjNOcGRHbHZia2tpQVpScGJteHBibVU3SUdacGJHVnVZVzFsUFNKGWFXNWtSWFZ](https://proceedings.windeurope.org/biplatform/rails/active_storage/disk/eYJfcmFpbHMiOnsibWVzc2FnZSI6IkJBaDdDRG9JYTJWNVNTSWhZV0Z4Y0RCM2F6SmxZMnRvYzI4NGFHUXdjWFZrYkdWd00yeDJid1k2QmtWVU9oQmthWE53YjNOcGRHbHZia2tpQVpScGJteHBibVU3SUdacGJHVnVZVzFsUFNKGWFXNWtSWFZ) [Citado el: 22 de noviembre de 2021]

Wind Europe. (mayo de 2020). *Accelerating Wind Turbine Blade Circularity*. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf> [Citado el: 12 de diciembre de 2021]

WWF. (mayo de 2015). *Especies y hábitats: Red Natura 2000*. [https://www.wwf.es/nuestro\\_trabajo/especies\\_y\\_habitats/red\\_natura\\_200/](https://www.wwf.es/nuestro_trabajo/especies_y_habitats/red_natura_200/) [Citado el: 12 de enero de 2022]

Paula Iria Taberero Pazos

---

YouTube (4 de julio de 2021) *Reciclaje de palas| El gran problema de la energía eólica.* YouTube.  
<https://www.youtube.com/watch?v=wDUPBGV7nD4> [Citado el: 10 de noviembre de 2021]