

GUÍA PARA EL DESARROLLO DE

CRITERIOS AMBIENTALES

A TENER EN CUENTA EN EL
DESMANTELAMIENTO Y REPOTENCIACIÓN DE
INSTALACIONES DE GENERACIÓN DE

ENERGÍA EÓLICA



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

La Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, a través de la Subdirección General de Economía Circular (SGEC), del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) agradece la colaboración de todas aquellas personas e instituciones que han contribuido con sus aportaciones al presente documento. Se autoriza la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, conocido o por conocer, comprendidas la reprografía y el tratamiento informático, siempre que se cite adecuadamente la fuente.

Dirección del proyecto:

Subdirección General de Economía Circular.
Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental.

Elaboración y coordinación:

Subdirección General de Economía Circular.
Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental.



MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Edita:

© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO)
Madrid, 2023
www.miteco.es

Plaza de San Juan de la Cruz, 10
28003 Madrid
ESPAÑA

NIPO: 665230051
Gratuita / Unitaria / En línea / pdf

Diseño y maquetación:

Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A., S.M.E., M.P. (TRAGSATEC)

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es/>

GUÍA PARA EL DESARROLLO DE CRITERIOS AMBIENTALES A TENER EN CUENTA EN EL DESMANTELAMIENTO Y REPOTENCIACIÓN DE INSTALACIONES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

ÍNDICE

Guía para el desarrollo de criterios ambientales a tener en cuenta en el desmantelamiento y repotenciación de instalaciones de generación de energía eólica

1

INTRODUCCIÓN

	8
1.1. La energía eólica en España	8
1.2. El fin de vida de un parque eólico	10
1.3. La prevención de residuos como primera opción para el sector eólico	11
1.4. Problemática asociada a la gestión de los residuos del sector eólico	13

2

OBJETIVO

	14
--	----

3

MARCO REGULATORIO

	16
3.1. Marco europeo	16
3.2. Marco nacional	19

4

ESTRUCTURA, COMPONENTES Y MATERIALES DE UN AEROGENERADOR

	22
4.1. Rotor	24
4.2. Góndola o “Nacelle”	26
4.3. Torre y cimentación	29
4.4. Materias primas fundamentales presentes	31

5

BUENAS PRÁCTICAS PARA EL FIN DE VIDA DE UN PARQUE EÓLICO

	34
5.1. Extensión de vida útil de los aerogeneradores	34
5.1.1. Elementos críticos de un aerogenerador	34
5.1.2. Estudios de diagnosis	36
5.1.3. Ventajas e inconvenientes	38
5.2. Repotenciación del parque eólico	40
5.2.1. Situación actual y potencial de repotenciación eólica en España	40
5.2.2. Repotenciación parcial o total	43
5.2.3. Mercado secundario para activos reutilizados	45
5.2.4. Comparativa entre extensión de vida útil y repotenciación	46
5.2.5. Ventajas e inconvenientes	47
5.3. Desmantelamiento de los aerogeneradores	48
5.3.1. Operaciones de desmantelamiento	48
5.3.2. Ventajas e inconvenientes	52

6

BUENAS PRÁCTICAS Y PREVISIONES DE FUTURO PARA EL RECICLAJE DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES DE UN AEROGENERADOR

	54
6.1. Material compuesto	55
6.1.1. Reciclaje mecánico	59
6.1.2. Reciclaje térmico	64
6.1.3. Reciclaje químico	68
6.1.4. Valorización energética	69
6.1.5. Casos de utilización como material estructural	70
6.1.6. Otras áreas de investigación	71
6.2. Otros materiales	75
6.2.1. Acero y metales varios	75
6.2.2. Hormigón y tierras excavadas	76
6.2.3. Madera de balsa	77
6.2.4. Aceites, líquidos hidráulicos y lubricantes	78
6.2.5. Aparatos Eléctricos y Electrónicos	80
6.2.6. Tierras raras	80
6.2.7. Adhesivos y revestimientos superficiales	80

7

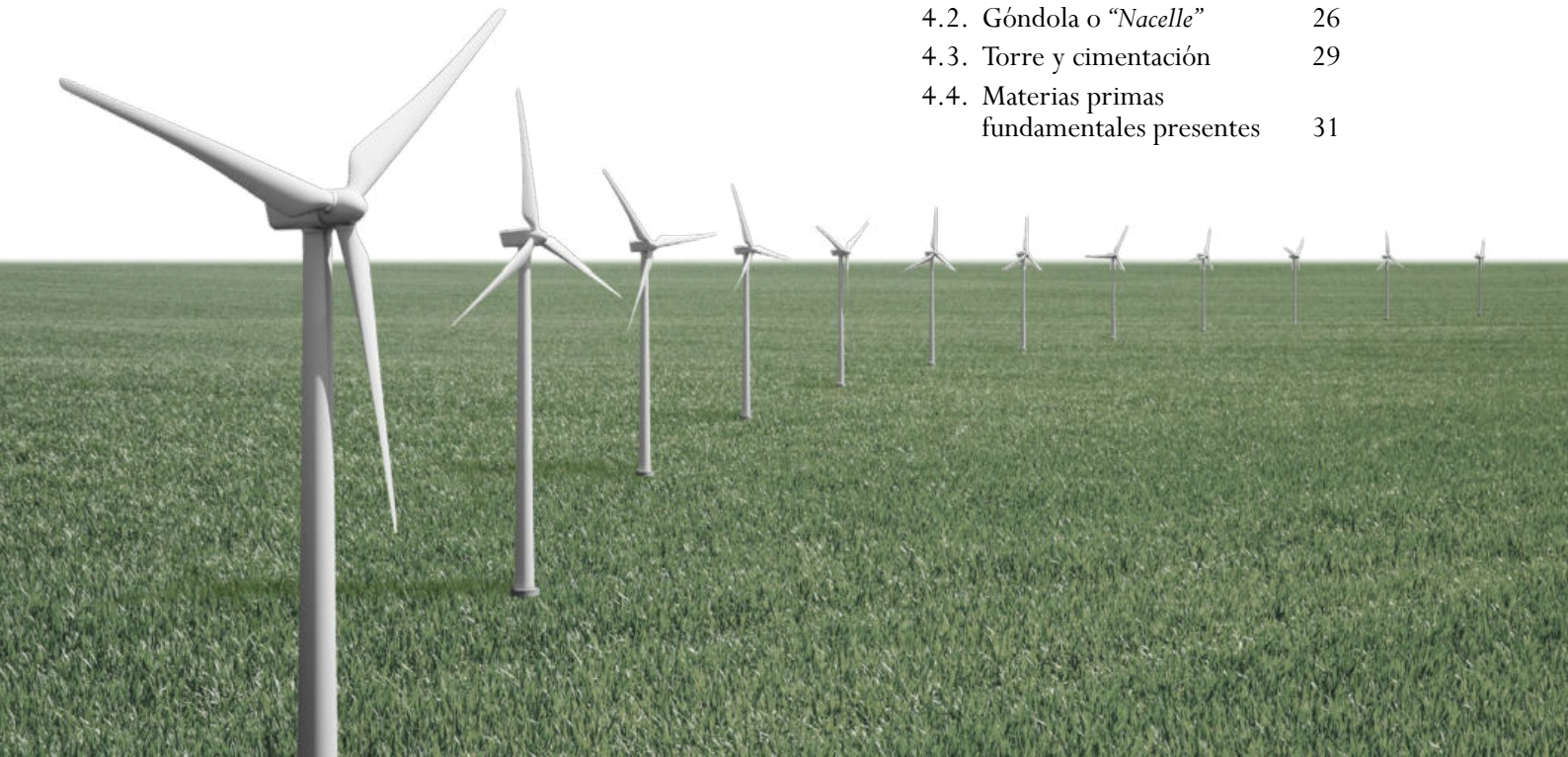
CONCLUSIONES

	82
--	----

A

ANEXO I. MATERIAS PRIMAS FUNDAMENTALES EN LOS AEROGENERADORES

	84
--	----



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de parques eólicos en España por comunidad autónoma en el año 2021...	9
Tabla 2. Peso previsto de metales en el flujo de residuos de los aerogeneradores europeos en los próximos años.	13
Tabla 3. Composición de los elementos de un aerogenerador.	22
Tabla 4. Materias primas consideradas críticas en 2020.	31
Tabla 5. Comparativa entre extensión de vida útil y repotenciación de los parques eólicos.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de potencia eléctrica instalada en España, según tecnología de generación.	9
Figura 2. Generación eólica expresada en GWh por año transcurrido.	11
Figura 3. Esquema de las partes comunes de un aerogenerador:	23
Figura 4. Partes del rotor de un aerogenerador.	24
Figura 5. Buje desarmado de un aerogenerador.	25
Figura 6. Componentes principales de una pala eólica.	26
Figura 7. Esquema del interior de la góndola o “nacelle”.	27
Figura 8. Construcción de la torre de un aerogenerador a partir de secciones tubulares de acero.	29
Figura 9. Esqueleto armado de una cimentación anclada.	30
Figura 10. Países que representen la mayor parte de la oferta global de materias primas críticas.	32
Figura 11. Esquema de la jerarquía de residuos aplicado a la gestión de residuos del sector eólico.	38
Figura 12. Evolución de la antigüedad del parque eólico en España.	40
Figura 13. Desmontaje del rotor completo (izq.) y desmontaje por palas (dcha.)...	50
Figura 14. Diferentes componentes de aerogeneradores desmontados en la zona de acopio.	51
Figura 15. Secuencia de restauración del hueco de los cimientos de un aerogenerador.	52
Figura 16. Clasificación de los materiales compuestos.	55
Figura 17. Microesferas y tejidos de fibra de vidrio (izq.) y fibra de carbono laminada (der.)...	56
Figura 18. Esquema simplificado de fabricación de material compuesto mediante pultrusión.	56
Figura 19. Distribución genérica de los materiales compuestos en la sección transversal de una pala de aerogenerador.	57
Figura 20. Generación estimada de residuos de materiales compuestos por sector en 2025 en la UE (toneladas).	58



Figura 21. Comparativa de las diferentes tecnologías.	58
Figura 22. Esquema simplificado del tratamiento de trituración mecánica.	59
Figura 23. Material compuesto con GFRP tras trituración.	60
Figura 24. Diagrama esquemático que muestra la desintegración de partículas sólidas por pulsos eléctricos de alta tensión.	61
Figura 25. Esquema simplificado del tratamiento de fragmentación por pulsos de Alta Tensión.	61
Figura 26. Esquema simplificado del proceso de coprocesamiento de cemento.	62
Figura 27. Operario cortando un fragmento de pala de aerogenerador. Se aprecian restos de las láminas de madera de balsa unidas al material compuesto.	63
Figura 28. Fibra de vidrio resultante.	64
Figura 29. Aplicando la mezcla en el pavimento.	64
Figura 30. Esquema simplificado del tratamiento por pirólisis y pirólisis por microondas.	65
Figura 31. Reactor piloto de pirólisis para palas de aerogenerador.	65
Figura 32. Esquema simplificado del tratamiento de lecho fluidizado.	66
Figura 33. Fibra de vidrio reciclada con (izq.) y sin (der.) trituración mecánica previa tras el tratamiento térmico de Reciclalia.	67
Figura 34. Esquema simplificado del tratamiento de solvólisis.	68
Figura 35. Balso (<i>Ochroma pyramidale</i>) en Costa Rica...	77
Figura 36. Sección de panel tipo sándwich con núcleo de madera y capas externas de Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP).	78
Figura 37. Fuga de aceite en aerogenerador.	79

INTRODUCCIÓN

1.1 La energía eólica en España

Las energías renovables se han visto impulsadas desde los años 70 a raíz de la creciente preocupación por la dependencia de recursos finitos y contaminantes para la generación de energía, lo que ha motivado el desarrollo de alternativas energéticas como la energía eólica. La energía eólica es considerada una energía renovable producida mediante el aprovechamiento de la energía cinética del viento a través del empleo de aerogeneradores.

A finales de los años 90 se sumó a la preocupación por la dependencia de los combustibles fósiles el interés por reducir los gases efecto invernadero para paliar el calentamiento global, lo que continuó favoreciendo el desarrollo y perfeccionamiento de las tecnologías empleadas en el sector de las energías renovables. Es por ello que se considera que la energía eólica ha tenido un desarrollo constante y un progreso notorio en el tiempo, puesto que en pocas décadas los aerogeneradores han evolucionado desde diseños que apenas eran capaces de generar unos pocos kW, a los nuevos aerogeneradores con potencias de hasta 2.000 kW¹.

Con el objetivo de avanzar hacia modelos de descarbonización que permitan la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores productivos y energéticos, España ha desarrollado el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (2021-2030)² y la Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050³, los cuales favorecen el incremento de las solicitudes para la instalación de nuevos parques eólicos en el territorio nacional. En la figura 1 se constata como la energía eólica ha cobrado gran importancia en relación a la potencia eléctrica instalada en España, situándose en la primera posición en el año 2021⁴.

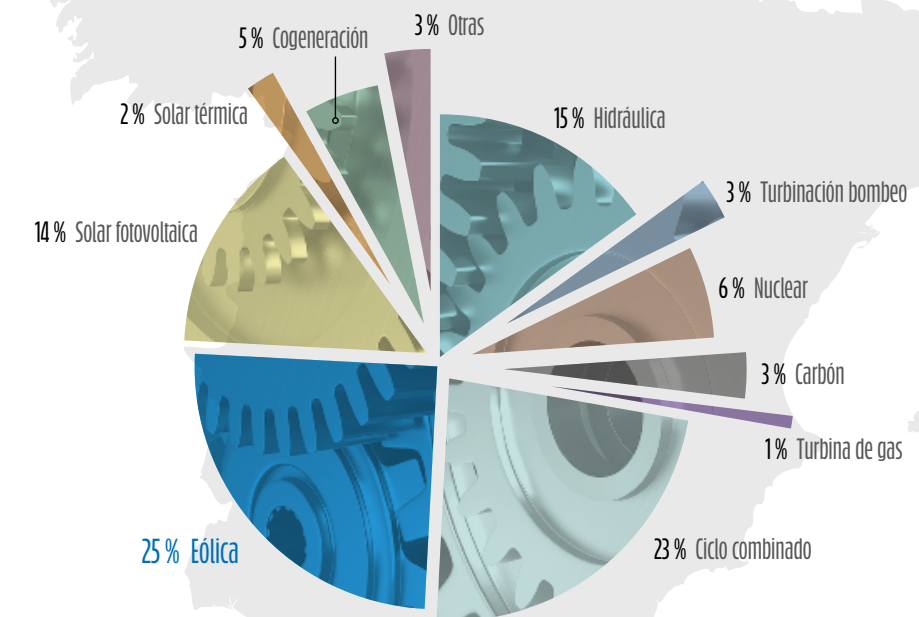


Figura 1. Porcentaje de potencia eléctrica instalada en España, según tecnología de generación.
Fuente: Elaboración propia en base a los datos de REE (2021)⁴.

Comunidad autónoma	Nº de parques eólicos
Andalucía	162
Aragón	168
Asturias	23
Baleares	46
Cantabria	3
Castilla La Mancha	148
Castilla y León	267
Cataluña	47
Comunidad Valenciana	39
Extremadura	1
Galicia	179
Islas Canarias	89
La Rioja	14
Murcia	14
Navarra	58
País Vasco	7
TOTAL	1.265

Tabla 1. Número de parques eólicos en España por comunidad autónoma en el año 2021.

Fuente: AEE (2021)⁵

En España, el primer parque eólico fue instalado en el año 1984 y a finales de 2008 ya estaban en funcionamiento un total de 18.841 aerogeneradores repartidos en 737 parques eólicos. En la actualidad, España cuenta con un total de 21.419 aerogeneradores, distribuidos en 1.265 parques eólicos (Tabla 1)⁵, lo que sitúa este país en el quinto puesto por potencia eólica instalada a nivel mundial tras China, Estados Unidos, Alemania e India⁶.

En la actualidad, la comunidad autónoma que cuenta con mayor potencia eólica instalada es Castilla y León (6.300 MW), siendo también la comunidad con más electricidad generada a partir de este tipo de energía, seguida de Aragón (4.159 MW) y Castilla La Mancha (3.886 MW)⁵. La distribución de estos parques eólicos está influenciada en gran medida por las horas de viento anuales recogidas en la zona, así como su distribución temporal y su densidad de potencia generada por metro cuadrado⁷. Las comunidades autónomas con mayor número de parques eólicos se corresponden con aquellas zonas con mayor velocidad media de viento anual.

¹ Marín, Cayetano (2004). *La energía eólica en España*. Investigaciones. Geográficas (Esp), núm. 35, 2004, pp. 45-65. Disponible en: <https://www.investigacionesgeograficas.com/article/view/2004-n35-la-energia-eolica-en-espana>

² MITECO (2020). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (2021-2030)*. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/imagenes/es/pniec/completo_tcm30-508410.pdf

³ MITECO (2020). *Estrategia de descarbonización a largo plazo 2050*. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/prensa/documentoelp_tcm30-516109.pdf

⁴ Red Eléctrica de España (2021). *Datos de potencia eléctrica instalada según tecnología*. Disponible en: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/potencia-instalada>

⁵ AEE (2021). *Anuario eólico 2021*. Disponible en: <https://aeeolica.org/aec-anuario-2021/>

⁶ AEE (2020). *Principales cifras del sector eólico en España*. Disponible en: <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/>

⁷ CENER (2020). *Mapa Ibérico del viento medio (serie 1989-2020)*. Disponible en: <https://www.mapaeolicoiberico.com/map;latitud=42.81953;longitud=-1.63290;altura=50;dato=micro>

Es importante destacar que, actualmente, la totalidad de los parques eólicos españoles son de tipo terrestre (*On-shore*). Pese a que los parques eólicos marinos (*Off-shore*) son de gran interés porque aprovechan los vientos marinos, normalmente de mayor intensidad, y generan un impacto paisajístico menor que los terrestres, las estructuras de soporte desarrolladas hasta la fecha no permiten su instalación a gran distancia de la costa. La posible complejidad del fondo, la profundidad y las severas condiciones marinas, como el oleaje y la corrosión salina, suponen un elevado coste de mantenimiento para estos aerogeneradores y un impedimento a la hora de instalarlos. Las nuevas tecnologías apuntan a la instalación de parques eólicos flotantes que permitirán una mayor captación de energía eólica en el futuro, anclando las plataformas flotantes al fondo marino mediante el empleo de cadenas o cables de acero⁸.

1.2 El fin de vida de un parque eólico

Se entiende por ciclo de vida de un producto al conjunto de etapas que atraviesa el mismo desde su concepción e introducción en el mercado hasta culminar su fase de declive en la que el producto alcanza el fin de su vida útil. Es decir, la fase final de su existencia en la cual se procede a categorizar el producto existente como residuo.

Esta fase final o fin de vida útil de un aerogenerador se produce, aproximadamente, a los 20 años de funcionamiento. En este punto existen dos posibles opciones para extender la fase de explotación de un parque eólico: por un lado, está la opción de extender la vida útil de los aerogeneradores, en caso de que esto sea posible, mediante el reemplazo o sustitución parcial de algunos elementos de las turbinas por otros nuevos o más modernos. Y, por otro, la repotenciación del parque eólico, que casi siempre implicará un desmantelamiento previo de los aerogeneradores obsoletos, pero que a su vez alargará la vida útil del parque en conjunto.

Según la definición de la Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables⁹, la repotenciación de los aerogeneradores que componen un parque eólico consiste en la “*renovación de las centrales eléctricas que producen energías renovables, incluyendo la sustitución total o parcial de las instalaciones o de los sistemas operativos y de los equipos, con el objetivo de reemplazar la capacidad o mejorar la eficiencia o la capacidad de la instalación*”. Dicha actividad ha de centrarse en aquellos parques con la maquinaria más obsoleta, los cuales suelen estar localizados en las áreas donde el recurso eólico es mejor y se ha estado aprovechando durante más tiempo.

Es por ello que, como se ha dicho, en este contexto el llamado “desmantelamiento” consiste en el desmontaje total o parcial de los equipos y los propios aerogeneradores con el fin de llevar a cabo la repotenciación del parque eólico (véase apartado 5). En caso de que esto no sea posible, o no sea económicamente viable, se puede proceder a la desinstalación y clausura definitiva del parque, procediendo posteriormente a la restauración del terreno para recuperar su estado original anterior a la construcción del parque eólico.

La elección entre una u otra estrategia dependerá de múltiples factores, como los cambios de normativa, el estado de los equipos, el desarrollo de tecnología eólica que facilite la repotenciación o que prime extender la vida útil del aerogenerador frente a su desmantelamiento, etc. Dado que alargar la vida útil de un aerogenerador no siempre es posible, es importante conocer cuáles

serán los flujos de residuos derivados de la actividad de desmantelamiento con el fin de poder darle el tratamiento más adecuado a cada uno de ellos¹⁰, algo que se verá más en detalle en el apartado 6.

Entre el 85 % y el 90 % de la masa total de la mayoría de las estructuras que conforman un aerogenerador (véase apartado 4) están compuestas, principalmente, por acero, aluminio y cobre, materiales que cuentan con un proceso de reciclado bien establecido, lo que facilita su recuperación a la vez que conserva su valor¹¹. Sin embargo, las palas del aerogenerador están fabricadas por, aproximadamente, un 67 % en peso de materiales compuestos, siendo, en su mayoría, resinas termoestables y fibras de vidrio y de carbono. Estos materiales compuestos son difíciles de separar y en la actualidad no se cuenta con un método de reciclaje bien establecido en el mercado que permita la recuperación de estos materiales sin que se produzcan ciertas pérdida de su valor útil y económico¹¹.

La búsqueda de nuevas alternativas frente al empleo de estos materiales compuestos, así como la búsqueda de un método de recuperación y reciclaje apropiado de los mismos que pueda ser desarrollado a nivel industrial es una de las principales preocupaciones del sector. Sin embargo, dado que en la actualidad la mayoría de las alternativas se encuentran disponibles a pequeña escala, en desarrollo o bajo investigación, es necesario tomar otras medidas que permitan reducir la generación de estos residuos.

1.3 La prevención de residuos como primera opción para el sector eólico

En España la generación de electricidad derivada del sector eólico se ha visto incrementada en los cinco últimos años, aumentando de 47.906,96 GWh a 60.485,00 GWh (figura 2)¹².

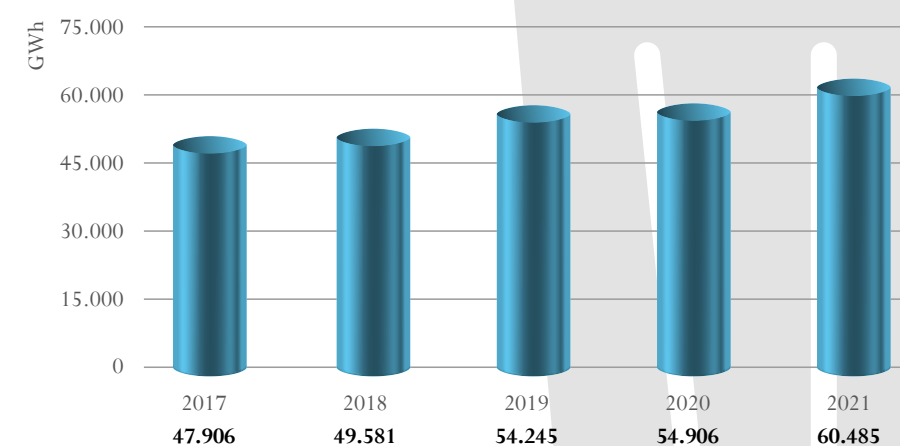


Figura 2. Generación eólica expresada en GWh por año transcurrido.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de REE (2021)¹².

Esta tendencia lleva asociado un crecimiento en la tasa de generación de residuos asociados a la energía eólica, especialmente ahora que los primeros parques eólicos están llegando al final de su vida útil. Tal y como se indicaba en el apartado anterior, en general,

las piezas de acero u otros metales valiosos pueden ser reciclados de manera sencilla. Sin embargo, otros materiales son difíciles de gestionar en la actualidad, siendo compleja su recuperación o reciclado, así como la viabilidad económica de sus procesos de tratamiento.

⁸ Comisión Europea (2021). *FLAGSHIP Project: Floating offshore wind optimization for commercialization*. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/952979/es>

⁹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:02018L2001-20220607&from=ES>

¹⁰ AEE (2021). *Economía Circular en el sector eólico: Palas de aerogeneradores*. Disponible en: https://aeeolica.org/wp-content/uploads/2021/12/AEE-2021-Economia-Circular-en-el-sector-eolico_Palas-de-los-Aerogeneradores.pdf

¹¹ WindEurope, Cefic & EuCIA (2020). *Accelerating Wind Turbine Blade Circularity*. Disponible en: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf>

¹² Red Eléctrica de España (2021). *Datos de generación eólica en GWh*. Disponible en: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/estructura-generacion>

La mejor estrategia para evitar la problemática asociada a estos residuos y contribuir a una economía circular es la prevención en su generación, primer escalón en la jerarquía de residuos establecida por la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular¹³, seguida de la preparación para la reutilización y el reciclaje. Como opción válida, pero menos deseable que las anteriores, está la valorización energética, que no aprovecha el material del residuo, pero sí su energía contenida. Por último, las opciones menos deseables según la jerarquía de residuos son la tradicional eliminación mediante depósito en vertedero o la incineración sin recuperación de energía.

Para prevenir la generación de residuos es importante actuar sobre diversos aspectos que influyen en el proceso de fabricación de los aerogeneradores, siendo uno de ellos, el ecodiseño. El ecodiseño consiste en integrar los aspectos ambientales en la concepción y desarrollo de un producto con el objetivo de mejorar su calidad y, a su vez, reducir los costes de fabricación, a través de metodologías basadas en el estudio de todas las etapas de su vida, desde la obtención de las materias primas y componentes hasta su eliminación y reciclado una vez desechado.

El ecodiseño influye en el proceso de producción desde la fase inicial, es decir, ha de tenerse en cuenta desde el mismo momento en el cual los materiales son seleccionados para la fabricación del producto, tratando de sustituir, en la medida de lo posible, aquellos materiales tóxicos y/o difíciles de recuperar o reciclar por otros que dispongan de la tecnología adecuada

para ello, reduciendo de este modo la generación de residuos peligrosos o que sean destinados a eliminación. Actualmente, se están llevando a cabo diversos estudios basados en la posible sustitución de materiales cuyo reciclaje es complejo. Entre ellos se puede encontrar el desarrollo de resinas “3R”, una nueva familia de resinas termoestables con mejores propiedades que permiten su reprocesamiento, reparación y reciclaje, o la introducción de nuevas resinas termoplásticas con mejores propiedades mecánicas¹⁰.

La prevención de residuos en la fase de diseño puede llevarse a cabo mediante la identificación de posibles puntos críticos, lo que permitirá actuar sobre los mismos y encontrar soluciones con antelación. Se han producido grandes avances en los últimos años en relación al desarrollo de sensores que puedan ser incorporados a las palas de los aerogeneradores, permitiendo conocer así el estado de los materiales y facilitando con ello su mantenimiento preventivo. Por otro lado, en esta fase del proceso es clave diseñar el producto de tal manera que se favorezca la separación de los componentes que lo forman, facilitando, de este modo, la reparación y la posible actualización de los equipos¹⁴.

También se debe tener en cuenta la posibilidad de reducir el material empleado a la hora de fabricar estos aerogeneradores ya que de esta manera se reducen los excedentes de fabricación. Una de las áreas abiertas de investigación aplicables a la fase de fabricación es, por ejemplo, la incorporación de procesos automáticos de fabricación que aseguren mantener las propiedades de los materiales o técnicas de fabricación más resistentes que permitan un aumento de la vida útil de las palas¹⁰.



1.4 Problemática asociada a la gestión de los residuos del sector eólico

En la actualidad existen, principalmente, dos causas identificadas por las que se sabe que se va a producir un incremento en la cantidad de residuos derivados de los parques eólicos en los próximos años:

- 1) Por un lado, la Unión Europea ha marcado como objetivo para el año 2030 recibir al menos el 32 % de la electricidad procedente de energías renovables, ya que se persigue la descarbonización del sector eléctrico y situar al conjunto de la Unión en un estado de neutralidad de carbono en 2050¹¹, lo que presumiblemente provocará la creación y puesta en marcha de nuevos parques eólicos en toda la región.
- 2) Por otro lado, en España, un 36 % de los aerogeneradores está alcanzando el final de su vida útil, concretamente, las primeras generaciones de aerogeneradores que fueron instalados en los años previos a 2005¹⁰. Además, en el año 2025 se estima disponer de casi 10.000 MW de potencia instalada con más de 20 años de antigüedad, lo que representará aproximadamente un tercio de la energía eólica española que habrá que actualizar, repotenciar o desmantelar¹⁵.

Tanto el esperado crecimiento exponencial, que tiene entre sus objetivos dejar atrás las energías no renovables, como el acercamiento al final de la vida útil de la primera generación de aerogeneradores instalados, tendrán como consecuencia un acusado incremento de los residuos del sector eólico.

En base a los datos históricos recogidos por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)¹⁶, el volumen de residuos estimado tomando como referencia aerogeneradores con una vida útil de 20 años será de casi 5 millones de toneladas en 2030 y estará compuesto en un 95 % por residuos de hormigón y acero. En la tabla 2 es posible identificar el volumen de residuos metálicos que se generarán en los próximos años, así como el volumen total de residuos esperado derivado de los aerogeneradores¹⁴.

Material	2020	2025	2030
Zinc	25.592	35.002	50.122
Cobre	11.388	15.574	22.287
Aluminio	5.560	7.570	10.577
Manganeso	3.669	5.018	7.189
Cromo	2.404	3.291	4.728
Níquel	1.843	2.511	3.528
Molibdeno	500	685	983
Tierras raras	215	307	537
TOTAL (t)	2.459.913	3.357.422	4.754.347

Tabla 2. Peso previsto de metales en el flujo de residuos de los aerogeneradores europeos en los próximos años.
Fuente: Graulich et al. (2021)¹⁴.

En el caso de las palas, se estima que en España será necesario gestionar un volumen de, aproximadamente, 145.475 toneladas en los próximos 5 años, generándose 29.095 toneladas anuales¹⁰.

Hasta la fecha, no ha sido necesario disponer de una normativa específica que ayude a controlar y gestionar los residuos del sector eólico debido a su (todavía) reducido volumen. Hasta ahora se han venido regulando con carácter general mediante la antigua Ley de Residuos y Suelos Contaminados, empleándose la disposición en vertedero como la opción de fin de vida predominante para los materiales más complejos de gestionar, como las palas. A la larga, esta solución provocará previsiblemente la colmatación de muchos vasos de vertido, siendo necesario disponer de nuevos espacios dedicados a tal fin. Por otro lado, la alternativa de la incineración puede provocar problemas técnicos en las instalaciones, así como la generación de elevados volúmenes de cenizas que deberán ser gestionadas posteriormente como residuo peligroso¹⁷.

Otro problema presente a la hora de gestionar estos residuos es la dificultad de separación y recuperación de los materiales compuestos de las palas del aerogenerador, puesto que todavía no se dispone de suficiente infraestructura industrial que cubra las necesidades de reciclaje del mercado en los próximos años¹⁰. Muchas de las técnicas y tecnologías de tratamiento de los materiales compuestos suelen acarrear pérdidas sustanciales del valor del material, lo que hace que sea más viable económicamente la eliminación que el reciclaje. Sin la existencia de alternativas para la recuperación, se continuarán desperdiciando materiales y extrayendo nueva materia prima no renovable. ■

¹³ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2022/BOE-A-2022-5809-consolidado.pdf>

¹⁴ Graulich, K; Betz, J. Öko-Institut e.V. (2021) *Emerging waste streams – Challenges and opportunities*. Disponible en: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/EEA_emerging-waste-streams_final-report.pdf

¹⁵ AEE (2019). *Fomento de la repotenciación de los parques eólicos*. Disponible en: <https://aeolica.org/fomento-de-la-repotenciacion-de-los-parques-eolicos/>

¹⁶ International Renewable Energy Agency (IRENA). Disponible en: <https://www.irena.org/?msclid=2d47dfeeb97c11ec9d3061631d295804>

¹⁷ CONAMA (2020) *Pavimentos asfálticos de alto valor añadido con fibra de vidrio recuperada mecánicamente de palas de aerogenerador en desuso*. Disponible en: <http://www.conama.org/conama/download/files/conama2020/CT%202020/5237.pdf>

2 OBJETIVO

La presente guía tiene por objetivo presentar el conjunto de acciones o buenas prácticas recomendadas por el sector a tener en cuenta durante el desmantelamiento y repotenciación de instalaciones de generación de energía eólica, entendiéndose como tales todos los equipos que integran dichas instalaciones, desde los aerogeneradores hasta los centros de transformación, edificios de control y demás infraestructuras que conformen el parque eólico, así como los tratamientos o tecnologías de reciclaje actuales y su nivel de desarrollo, para facilitar el conocimiento en cuanto a la gestión de los residuos producidos al final de la vida útil del parque eólico. Con ello se pretende facilitar el avance hacia una economía circular, reducida en carbono, eficiente en recursos y a la producción de una energía competitiva con el menor impacto posible en el medio ambiente. ■





MARCO REGULATORIO

3.1 Marco europeo

En los últimos años se ha fomentado en la Unión Europea la transición hacia una energía más limpia. Estrategias europeas como el Libro Verde sobre clima y energía para 2030¹⁸, la Hoja de Ruta de la Energía para 2050¹⁹ o el Pacto Verde Europeo²⁰ exigen nuevas políticas para la ejecución de proyectos de energía renovable que consigan alcanzar la neutralidad climática. Consecutivamente, se publicó la Estrategia sobre las Energías Renovables Marinas²¹, que también potencia las renovables eólicas marinas.

Con el objetivo de impulsar esta transición, la Comisión Europea reforzó el Pacto Verde Europeo con el Nuevo Plan de acción para la economía circular por una Europa más limpia y más competitiva²². Dicho Plan fomenta la circularidad de los materiales con principios que incluyen la reutilizabilidad, la reparabilidad, posibilitar el refabricado y el reciclado de alta calidad y reducir la huella de carbono y la huella ecológica. Si bien la eficiencia en el uso y gestión de los recursos es clave para el avance en los objetivos de circularidad y neutralidad climática, es conveniente dibujar el mapa de acción en el sector de las energías eólicas que incentive y facilite la jerarquía de residuos y las políticas verdes.

Actualmente Europa no dispone de ningún tipo de legislación específica para la extensión de vida útil, la repotenciación o el desmantelamiento de los parques eólicos. En ese caso, los Estados Miembros pueden desarrollar un régimen jurídico que ampare y regule los procesos de desmantelamiento, como ha realizado Alemania, Francia o Italia entre otros²³. Por otro lado, si no se han establecido unas normas generales para legislar específicamente el fin de vida útil de una instalación de energía eólica, dado que no existe un marco común legislativo, es necesario basarse en otro tipo de regulación disponible.

La legislación europea en materia de residuos es un aspecto importante a tener en cuenta en el fin de vida útil de un parque eólico dado que el desmantelamiento del mismo implica la producción de una alta diversidad de residuos que deben ser gestionados de acuerdo con la regulación existente de aplicación. Dicha normativa en materia de residuos está estructurada por la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas²⁴. Esta Directiva (Marco de Residuos) representa la base regulatoria de todos los flujos de residuos y por la que se sientan las directrices maestras para su correcta gestión.

La diversidad de residuos que se generan en estos proyectos supone que, además de la Directiva Marco, se regule su gestión por normas dedicadas a flujos específicos de residuos, como por ejemplo, para el caso de los Residuos

de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (en adelante RAEE), la Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos²⁵ (Directiva RAEE). Los RAEE resultantes del desmantelamiento de los aerogeneradores están sujetos a la Directiva de RAEE si no han sido diseñados específicamente como parte de estas instalaciones y hayan sido instalados en ellas. El principal es el transformador, que representa aproximadamente la mitad del peso total de los RAEE generados²⁶, aunque también se encontrarían los conmutadores o el cableado. En este contexto, los RAEE se deben recoger de forma separada por un gestor autorizado y ser transportados de forma óptima para los correspondientes tratamientos de preparación para la reutilización, reciclado y confinamiento de las sustancias peligrosas conforme a la Directiva RAEE.

Complementariamente, las pilas y baterías, y los acumuladores empleados en los aerogeneradores y en los edificios del parque eólico deben ser gestionados conforme a la Directiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 6 de septiembre de 2006 relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores y por la que se deroga la Directiva 91/157/CEE²⁷, independientemente de su forma, volumen, peso, composición o uso. Acorde con dicha norma, los residuos de las baterías y acumuladores que se emplean en los parques eólicos cuando se genera más electricidad de la que se consume (ubicados en los edificios de los parques eólicos) o los acumuladores disponibles en algunos modelos de aerogeneradores que se emplean como fuente de alimentación de emergencia cuando se producen cortes de electricidad se deben recoger a través del sistema que se haya implantado a tal fin y se deberán tratar y reciclar de acuerdo con la mencionada Directiva.

¹⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0169&from=ES>

¹⁹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0885&from=ES>

²⁰ https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF

²¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0741&from=ES>

²² https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0018.02/DOC_1&format=PDF

²³ WindEurope (2020). *Decommissioning of Onshore Wind Turbines - Industry Guidance Document*. Disponible en: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/decommissioning-of-onshore-wind-turbines/>

²⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=ES>

²⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=ES>

²⁶ Agencia Federal de Medio Ambiente (2019). Desarrollo de un concepto y medidas para un desmantelamiento de turbinas eólicas que ahorre recursos. Disponible en: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019_10_09_texte_117-2019_uba_wa-cycle_mit_summary_and_abstract_170719_final_v4_pdf_fua_0.pdf

²⁷ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006L0066-20180704&from=ES>

Un flujo de residuos que no se regula por una norma europea específica son los aceites usados. Los aceites y lubricantes que se emplean en los parques eólicos y los aerogeneradores pueden ser muchos y de distintos tipos, como los destinados a engranajes, a motores y rodamientos, sistemas hidráulicos, turbinas y otros componentes o subcomponentes. Este flujo de residuos se encuentra regulado en la Directiva Marco donde se establece su recogida separada, su tratamiento, su no mezcla y el desarrollo de los requisitos por los Estados Miembros.

Por otro lado, existen protocolos, como el Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE²⁸, que facilitan la correcta gestión de los distintos tipos de residuos generados en una obra. Los residuos de construcción y demolición (en adelante RCD) que se generan en el desmantelamiento de un parque eólico proceden principalmente de la cimentación de los aerogeneradores. La cantidad de RCD que se genera es alta, dado que las cimentaciones están constituidas principalmente por hormigón y las tierras excavadas de la cimentación, y por el acero de refuerzo. También se generan RCD en el desmantelamiento de otras instalaciones, edificaciones o infraestructuras vinculadas al parque eólico.

También es relevante, para las distintas operaciones en las instalaciones, tener en cuenta el Reglamento (UE) No 517/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de abril de 2014 sobre los gases fluorados de efecto invernadero y por el que se deroga el Reglamento (CE) no 842/2006²⁹. Los gases fluorados pueden emplearse como aislantes en componentes de las instalaciones de generación de energía eólica como refrigeradores, bombas de calor, transformadores eléctricos y en mayor medida en equipos de transmisión y distribución para evitar cortocircuitos³⁰. Dados los grandes efectos negativos para el medio ambiente, es imprescindible, en los casos determinados en el Reglamento, contar con una persona certificada para el desmantelamiento de los componentes que contengan gases fluorados para la prevención de fugas.

Finalmente, como ya se ha mencionado anteriormente, uno de los problemas a los que se enfrenta un aerogenerador al final de su vida útil es la ausencia de tecnologías de reciclaje suficientemente implantadas en el mercado para los materiales más complejos de recuperar, por lo que muchos operadores optan por la poco deseable opción de la eliminación de determinados residuos mediante incineración o envío a vertedero, se hará en cumplimiento con la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación)³¹ y con la Directiva 1999/31/CE del Consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos³², respectivamente.

3.2 Marco nacional

España avanza en la consecución de medidas que impulsen las energías renovables con estrategias como las encuadradas en el Marco Estratégico de Energía y Clima³³, presentado por el Gobierno en 2019, que persigue transformar el tejido empresarial español para facilitar la transición energética. Dentro de este marco destaca el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030³⁴, que pretende reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de políticas que aprovechen eficientemente el potencial renovable existente en nuestro país. En el Plan se establece que para el año 2030 se destinen 50 GW a energías eólicas, se potencie la investigación en esta área y se dé una mayor apertura a los parques eólicos marinos. En relación con este último, se ha publicado

en consonancia con Europa la Hoja de Ruta para el Desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar en España³⁵. En el documento se muestra que, a pesar del gran recurso eólico marino que tiene disponible el país, queda mucho potencial que aprovechar mediante proyectos de energía eólica marina.

Paralelamente, el Consejo de Ministros aprobó en 2021 el Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (en adelante PERTE) de Energías Renovables, Hidrógeno Renovable y Almacenamiento³⁶, que sitúa las energías renovables como una de las principales líneas de actuación para fortalecer la transición energética en el país. Específicamente en el sector de las eólicas, se destaca el incentivo a la repotenciación de los parques eólicos, el reciclaje de las palas, la energía eólica marina y el almacenamiento, entre otros. Y es que las acciones que tratan de maximizar los recursos disponibles para que estos permanezcan el mayor tiempo en el ciclo productivo y reduzcan la generación de residuos son fundamentales para la reducción de emisiones y la optimización de los beneficios energéticos. Por ello se publicó la Estrategia Española de Economía Circular, España Circular 2030³⁷. Con este documento se promueve la extensión de vida útil, el aprovechamiento al máximo los recursos y la adopción de innovaciones tecnológicas, organizativas y sociales, que en contexto de la energía eólica supone un progreso en la industria energética.

Posteriormente a la entrada en vigor de estos instrumentos de planificación, en 2022 se aprobó el PERTE de Economía Circular, el cual presenta sinergias con los anteriores PERTE publicados, y está más centrado en el ecodiseño, la reutilización y el reciclado de los aerogeneradores. Dentro de este programa se presentan unas líneas de ayudas específicas para los parques eólicos, con las que se pretende potenciar el ecodiseño a la hora de fabricar los futuros aerogeneradores; aumentar la reutilización de éstos en otros sectores; desarrollar sistemas de desmantelamiento *in-situ* de los elementos más voluminosos para abaratar y simplificar el traslado de los residuos a las plantas

²⁸ Comisión Europea (2016). *Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE*. Disponible en: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/attachments/1/translations/es/renditions/native>

²⁹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=ES>

³⁰ REVE (2019). *Energía eólica, cambio climático, CO₂ y SF₆ en perspectiva*. Disponible en: <https://www.evwind.com/2019/09/25/energia-eolica-cambio-climatico-y-sf6-en-perspectiva/>

³¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075&from=ES>

³² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:01999L0031-20180704&from=ES>

³³ https://www.miteco.gob.es/images/es/1marcoestrategicodeenergiayclima_tcm30-487329.pdf

³⁴ <https://www.boe.es/boe/dias/2021/03/31/pdfs/BOE-A-2021-5106.pdf>

³⁵ MITERD (2021). *Hoja de ruta eólica marina y energías del mar en España*. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/idae/tecnologias/energias-renovables/eolica/Hoja_de_Ruta_para_el_desarrollo_de_la_Eolica_Marina_y_de_Las_Energias_del_Mar_en_Espa%C3%B1a_ES.pdf

³⁶ <https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2021/151221-Informe-pertes-renovables-2021.pdf>

³⁷ MITECO (2020). *España Circular 2030 - Estrategia Española de Economía Circular*. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/espanacircular2030_def1_tcm30-509532_mod_tcm30-509532.pdf

de tratamiento e implantar y desarrollar instalaciones capaces de reciclar de manera eficiente los distintos materiales de los aerogeneradores y crear una cadena de valor completa en torno al reciclaje de los distintos elementos que los conforman.

En el ámbito normativo, recientemente se ha aprobado el Real Decreto-ley 23/2020, de 23 de junio, por el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica³⁸. Este Real Decreto-ley establece las condiciones para la ampliación de potencia instalada sin necesidad de pedir nuevas autorizaciones ambientales. En adición, es destacable mencionar en el marco normativo nacional el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial³⁹, dado que regula los casos de repotenciación de instalaciones eólicas con fecha de inscripción definitiva anterior al 31 de diciembre de 2001.

Es de mención que los proyectos de generación de energía eólica requieren de acuerdo con el Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica⁴⁰, que el titular de la instalación acompañe la solicitud de un proyecto de cierre al menos con una memoria en la que se detallen las circunstancias técnicas, económicas, ambientales o de cualquier otro orden, por las que se pretende el cierre, así como los planos actualizados de la instalación a escala adecuada. Además, aquellas instalaciones de energía eólica sometida a la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental⁴¹, principalmente las que se encuentren bajo evaluación ambiental ordinaria pero también las que necesiten de evaluación ambiental estratégica, deberán velar por la correcta gestión de los residuos generados incluidos los de su desmantelamiento. En este sentido, la gestión de los residuos generados en el fin de vida útil de estas infraestructuras necesita que se encamine hacia la economía circular.

Los residuos que se generan en el desmantelamiento, la repotenciación y la extensión de vida útil de los

parques eólicos deben gestionarse según lo establecido en la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular¹³. Se trata de la norma que transpone la Directiva 2018/851/CE y la que sienta la base para la gestión de los residuos en España. Esta Ley releva a su predecesora, la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, y es el fundamento en materia de residuos para que los residuos generados en proyectos de las instalaciones de generación energía eólica se gestionen de forma correcta y legal.

Una parte importante de los residuos que se generan en el desmantelamiento o clausura de una instalación de energía eólica son los RCD. Su régimen jurídico en España es el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición⁴². La norma establece las obligaciones que deben de cumplir los productores, poseedores y gestores de RCD además de los requisitos para la gestión de estos residuos bajo responsabilidad de gestor autorizado.

Otros dos de los principales flujos de residuos que se generan en el desmantelamiento de instalaciones de generación de energía eólica son los RAEE, amparados en el Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos⁴³; y las pilas y los acumuladores, regulados por

el Real Decreto 106/2008, de 1 de febrero, sobre pilas y acumuladores y la gestión ambiental de sus residuos. Estas normativas establecen los procedimientos para la correcta trazabilidad y gestión de los residuos dando prioridad a la preparación para la reutilización para los RAEE y el reciclado para las pilas y los acumuladores que se encuentran en los aerogeneradores y en los edificios de los parques eólicos.

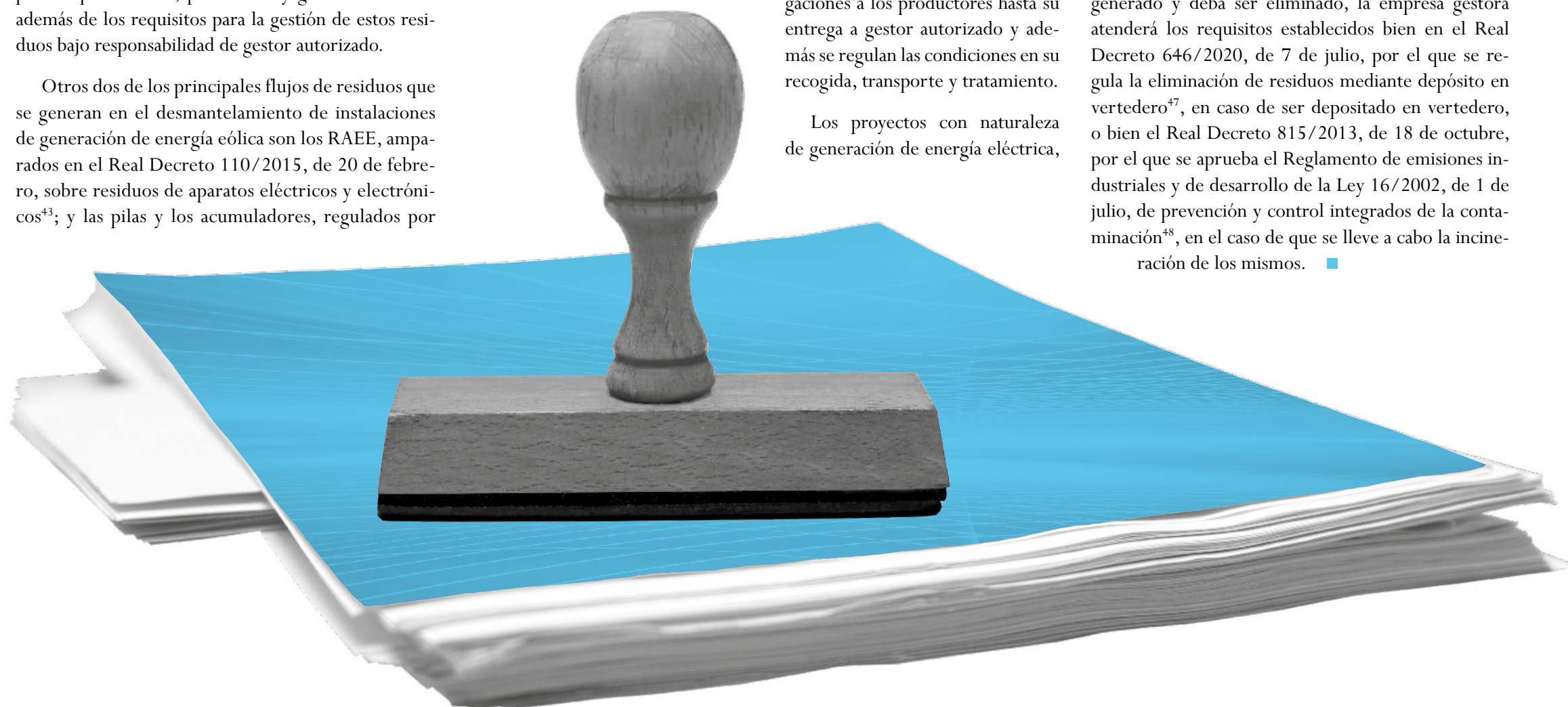
Los aceites que se emplean en las instalaciones, como los destinados a engranajes, motores y rodamientos, sistemas hidráulicos, turbinas y otros componentes o subcomponentes, se consideran aceites usados y se deben gestionar de acuerdo con el Real Decreto 679/2006, de 2 de junio, por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados⁴⁴. Dada la cantidad de afecciones que puede ocasionar este residuo, se han establecido en este Real Decreto obli-

gaciones a los productores hasta su entrega a gestor autorizado y además se regulan las condiciones en su recogida, transporte y tratamiento.

Los proyectos con naturaleza de generación de energía eléctrica,

como actividad potencialmente contaminante, han de tener en cuenta el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados⁴⁵. Además, componentes de las instalaciones como son refrigeradores, bombas de calor, transformadores eléctricos o equipos de transmisión y distribución pueden contener gases fluorados por lo que deben seguir el Real Decreto 115/2017, de 17 de febrero, por el que se regula la comercialización y manipulación de gases fluorados y equipos basados en los mismos, así como la certificación de los profesionales que los utilizan y por el que se establecen los requisitos técnicos para las instalaciones que desarrollen actividades que emitan gases fluorados⁴⁶.

En caso de que no se pueda valorizar el residuo generado y deba ser eliminado, la empresa gestora atenderá los requisitos establecidos bien en el Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero⁴⁷, en caso de ser depositado en vertedero, o bien el Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación⁴⁸, en el caso de que se lleve a cabo la incineración de los mismos. ■



³⁸ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2020/BOE-A-2020-6621-consolidado.pdf>
³⁹ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-10556-consolidado.pdf>
⁴⁰ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2000/BOE-A-2000-24019-consolidado.pdf>
⁴¹ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-12913-consolidado.pdf>
⁴² <https://www.boe.es/buscar/pdf/2008/BOE-A-2008-2486-consolidado.pdf>
⁴³ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2015/BOE-A-2015-1762-consolidado.pdf>

⁴⁴ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2006/BOE-A-2006-9832-consolidado.pdf>
⁴⁵ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2005/BOE-A-2005-895-consolidado.pdf>
⁴⁶ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2017/BOE-A-2017-1679-consolidado.pdf>
⁴⁷ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2020/BOE-A-2020-7438-consolidado.pdf>
⁴⁸ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-10949-consolidado.pdf>

4

Guía para el desarrollo de criterios ambientales a tener en cuenta en el desmantelamiento y repotenciación de instalaciones de generación de energía eólica

ESTRUCTURA, COMPONENTES Y MATERIALES DE UN AEROGENERADOR

Como se viene comentando en este documento, la dificultad a la hora de abordar el desmantelamiento y posterior reciclaje de los distintos componentes de un aerogenerador se debe a la heterogeneidad de materiales presentes. Aunque la mayor parte de los aerogeneradores están formados por un número de materiales no muy elevado, las palas son los elementos que poseen más complejidad en cuanto a composición. Los metales como el acero, el cobre y el aluminio representan alrededor del 86 % del peso total de un aerogenerador⁴⁹, y el resto se divide entre los llamados materiales compuestos de las palas y otros elementos críticos.

Por definición, los materiales compuestos consisten en la unión de dos o más materiales distintos, de manera que se obtiene un nuevo material con mejores propiedades que las de sus constituyentes por separado. Los materiales compuestos tienen propiedades mecánicas superiores, como mayor resistencia y menor peso, comparados con la mayor parte de los metales y sus aleaciones, por lo que son utilizados en numerosas aplicaciones estructurales en diversos sectores, no solo en el eólico, en los que la ligereza y la resistencia sean requeridos. El material compuesto de las palas generalmente está fabricado con una combinación de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (en adelante, GFRP, por sus siglas en inglés, *Glass Fiber Reinforced Plastic*) y resinas termoestables como epoxis, poliésteres y ésteres de vinilo, aunque en la actualidad se está empezando a sustituir la fibra de vidrio por Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono (en adelante, CFRP, por sus siglas en inglés, *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) por sus mayores ventajas estructurales.

Además de los materiales compuestos, una pala eólica también tiene, en menor proporción, otros materiales como PVC, “gelcoats” (recubrimientos), madera de balsa, distintos poliuretanos y revestimientos superficiales y pinturas en función del fabricante, que confieren diversas características relacionadas con la aerodinámica o la resistencia, pero a la vez dificultan su posterior reciclaje. En la tabla 3 se detalla la proporción en peso de los materiales de los componentes más característicos de un modelo genérico de aerogenerador. Estos materiales, junto con los compuestos, se tratarán en detalle en el apartado 6.

Parte	Componente	Tipo de material. (en % de peso)					
		Hormigón	Acero	Aluminio	Cobre	Materiales compuestos	Otros
Rotor	Buje		100				
	Palas		3			67	30
Góndola	Multiplicadora		96	2	2		
	Generador		65		35		
	Maquinaria, otros		84	9	4	3	
Torre (de acero)		2	98				

Tabla 3. Composición de los elementos de un aerogenerador.

Fuente: AEE¹⁰.

Como se aprecia en la tabla, en orden inverso al montaje, el aerogenerador se divide generalmente en tres grandes partes: rotor, góndola y torre y cimentación (figura 3), constando, a su vez, de una serie de componentes. A mayores de los componentes indicados en la tabla, los aerogeneradores también tienen multitud de elementos mecánicos (tornillos, tuercas, bridas, fundas, etc.), eléctricos (cableado, luces, interruptores, etc.) y electrónicos, entre otros, todos ellos necesarios y frecuentes en cualquier tipo de instalación energética.

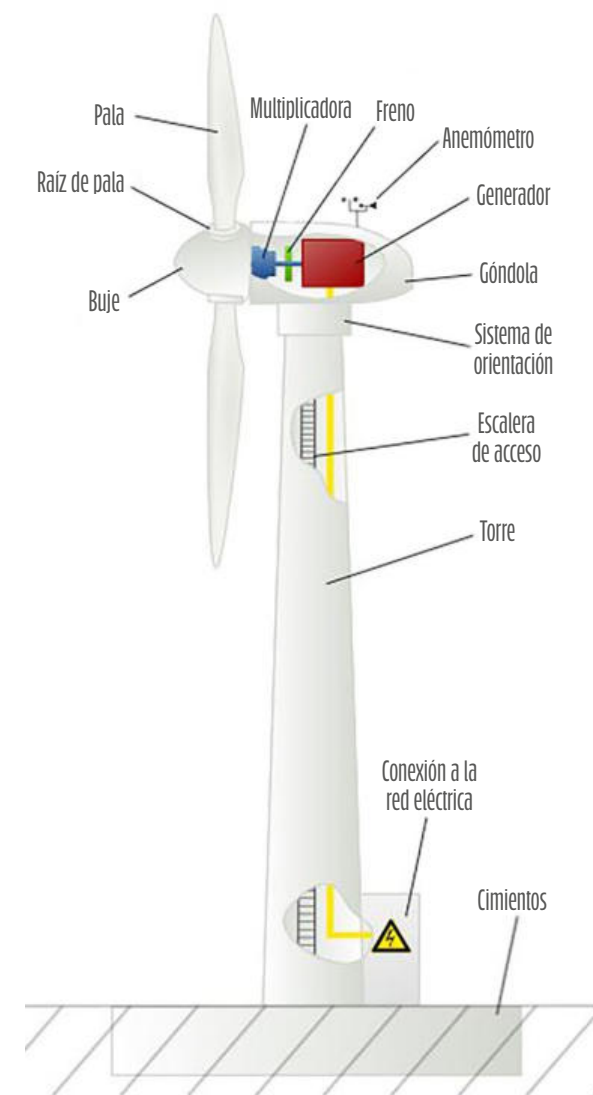


Figura 3. Esquema de las partes comunes de un aerogenerador.

Fuente: Arne Nordmann (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_int.svg)

A continuación, se profundizará en los componentes más representativos de un aerogenerador de eje horizontal, los más empleados en los parques eólicos, así como en los materiales con los que son más comúnmente fabricados, pues esta composición puede variar según el fabricante o el modelo.

⁴⁹ REVE (2018). *Energía eólica: investigación e innovación de los materiales raros de los aerogeneradores*. Disponible en: <https://www.evwind.com/2018/11/15/energia-eolica-investigacion-e-innovacion-necesarias-para-proporcionar-sustitutos-de-materiales-raros-utilizados-en-los-aerogeneradores/#:~:text=Los%20metales%20como%20el%20acero,de%20las%20turbinas%20e%C3%B3licas%20actuales>

4.1 Rotor

El rotor es comúnmente definido como el elemento que gira en cualquier máquina eléctrica, ya sea un motor o un generador, como en el caso de los aerogeneradores. Esta parte está formada, normalmente, por tres palas (dos en algunos casos), el buje y el cono (figura 4).

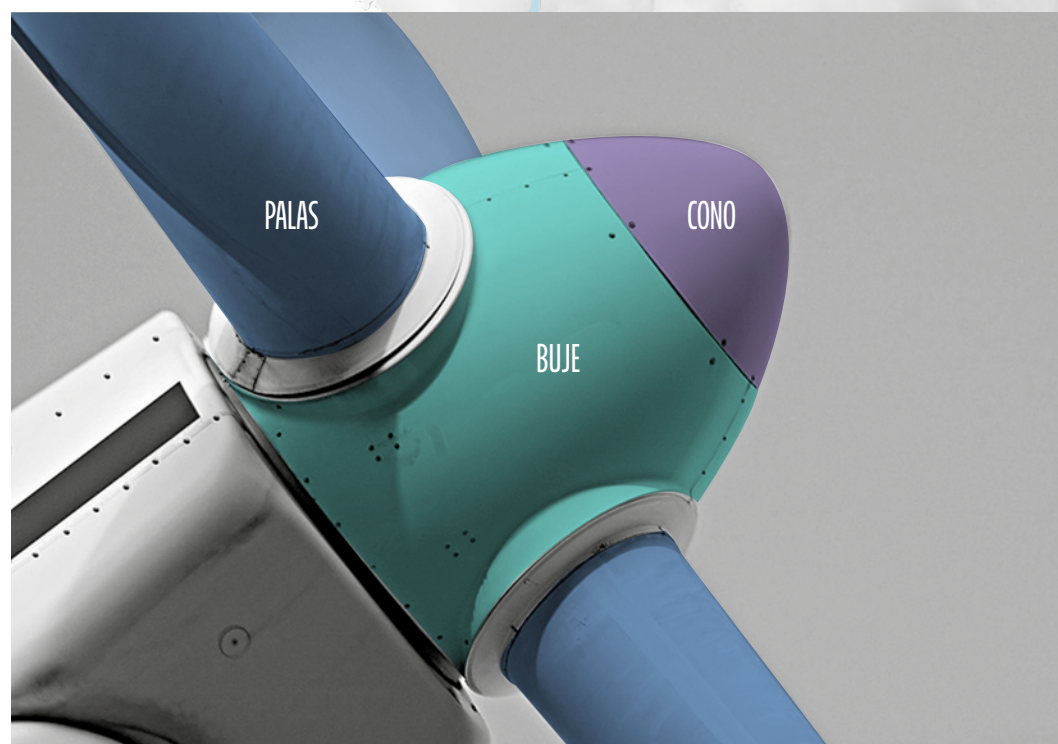


Figura 4. Partes del rotor de un aerogenerador.

Fuente: André Karwath aka Aka (modificado) (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windrad-Nahaufnahme.jpg>)

Cono

Cubierta cónica metálica, conocida también como *nariz* o *carenado*, que se encara contra la dirección del viento de forma que desvíe la energía hacia el resto del rotor gracias a su forma aerodinámica. También realiza la función de embellecedor del buje.

Buje

El buje es el elemento al que van unidas las palas y que, a su vez, une las palas con el eje de baja velocidad de la góndola. Situado en la parte frontal del aerogenerador, es el único elemento exterior que gira. Al buje se unen los rodamientos de pala, que permiten orientar la pala, ajustándola a los ángulos de paso adecuados para obtener la máxima eficiencia y controlar la producción de potencia y la carga, constituyendo así el principal sistema de frenado. Normalmente, está fabricado con acero fundido y puede llegar a superar las 30 toneladas de peso⁵⁰, pese a ser hueco (figura 5).



Figura 5. Bujes desarmados de un aerogenerador.

Fuente: Paul Anderson (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hub_for_Turbine_Tower_No_11_-_geograph.org.uk_-_787091.jpg)

Palas

Tanto en términos de economía circular como de ecodiseño, las palas son la parte más importante de los aerogeneradores. Las palas son las responsables de capturar la energía cinética del viento y transmitir su potencia al buje, originando un movimiento rotatorio respecto al eje de giro del aerogenerador. Para cumplir con este propósito deben cumplir una serie de requisitos, como tener una alta resistencia a la fatiga material y a la afección de los diversos agentes medioambientales, rigidez y bajo peso. Es uno de los componentes más críticos de la máquina ya que, en palas de gran longitud que permiten un mejor aprovechamiento de la energía, las altas velocidades que se consiguen en los extremos llevan al límite la resistencia de los materiales con que están fabricadas.

Existen palas de muchos tamaños y diseños, dependiendo fundamentalmente de la potencia que se quiera generar. Las palas de rotor suelen construirse utilizando una matriz de mallas de fibra de vidrio impregnadas de un material como el poliéster. En los aerogeneradores de gran tamaño, las palas se encuentran construidas a partir de una estructura central, encerrada por más de dos cubiertas exteriores formando un perfil aerodinámico con forma alabeada y un ancho decreciente hacia la punta, similar al diseño de las alas de una aeronave (figura 6).

⁵⁰ Actitud Ecológica. Aerogeneradores. Disponible en: <https://actitudecologica.com/energias-renovables/eolica/aerogeneradores/>

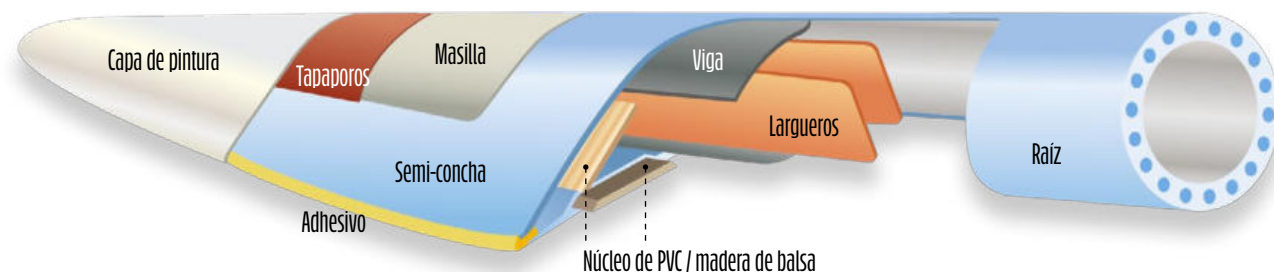


Figura 6. Componentes principales de una pala eólica.
Fuente: elaboración propia.

En aerogeneradores pequeños es frecuente el empleo de palas hechas mediante aleaciones de acero y de aluminio, pero debido a problemas de peso y de fatiga del metal, estos materiales se descartan en aerogeneradores de mayor tamaño. De este modo y como se ha mencionado anteriormente, la mayoría de aerogeneradores utilizan una serie de materiales compuestos que contienen hasta un 75 % en peso de fibra de vidrio⁵¹. Es a causa de estos materiales compuestos por lo que el reciclaje de las palas de los aerogeneradores es tan significativo, pues su composición es variada y de compleja gestión como residuo.

Actualmente, las palas pueden fabricarse con distintos materiales compuestos. Fundamentalmente, se pueden encontrar aerogeneradores cuyas palas estén fabricadas de alguna de las formas que indicadas a continuación:

- Aleaciones de acero y aluminio. Utilizados en aerogeneradores pequeños.
- Fibra de vidrio reforzada con resina poliéster.

- Fibra de carbono o aramidas (Kevlar 29 o Kevlar 49).
- Compuestos de madera, madera-epoxy o madera-fibra-epoxy.
- Mixtos a partir de combinaciones de los anteriores.

4.2 Góndola o “Nacelle”

La góndola se trata de un cubículo situado en la parte alta de la torre que está fabricada con acero forjado y placas de material compuesto, y que sirve de alojamiento a los elementos mecánicos y eléctricos del aerogenerador, por lo que se suele considerar la “sala de máquinas” de este.

Está constituido por la carcasa, la parte externa de material compuesto reforzado con perfiles de acero inoxidable que recubre y protege todas las piezas interiores; y el bastidor, que se trata de la pieza sobre la que se acoplan los principales elementos mecánicos como el rotor, el multiplicador o el generador (figura 7).

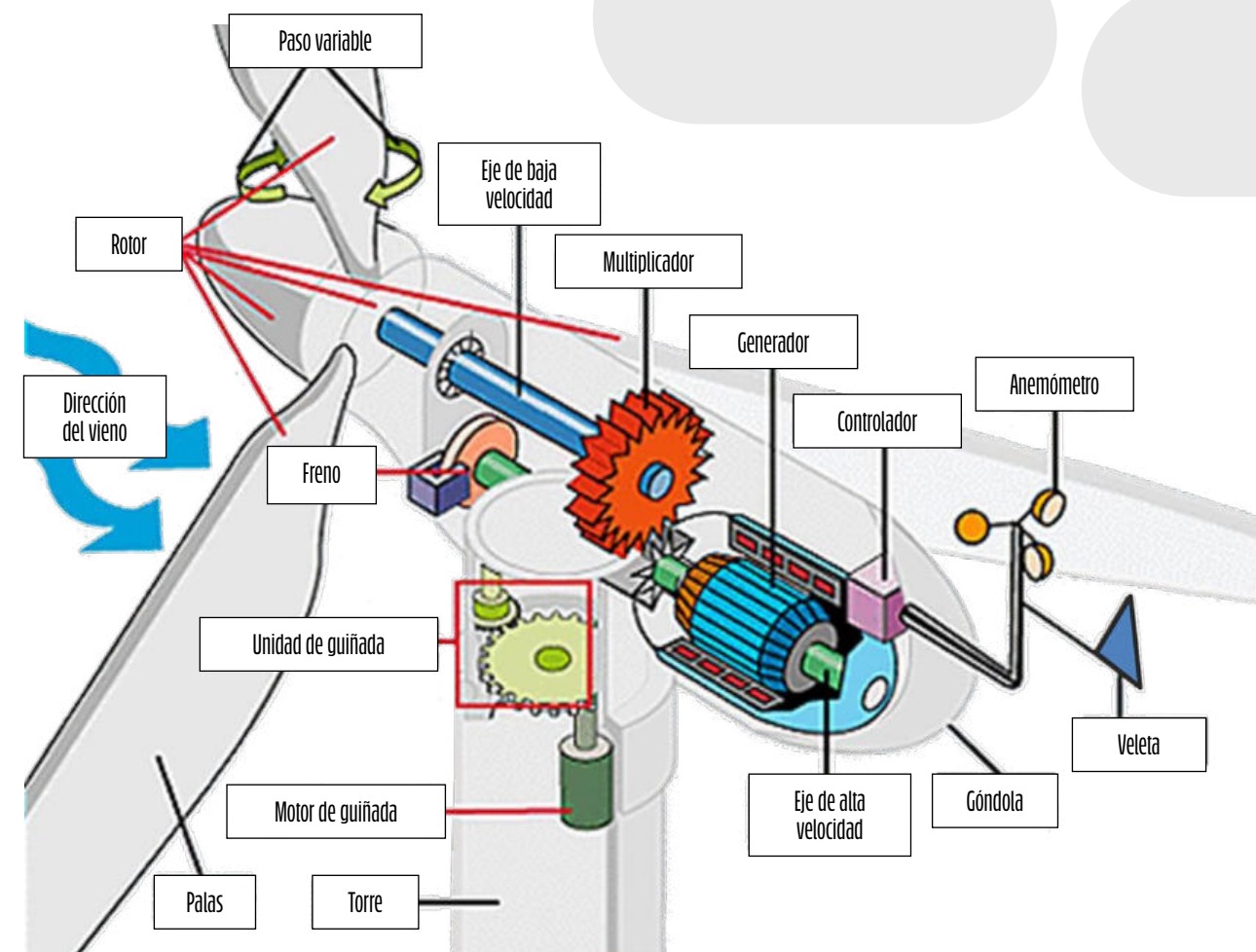


Figura 7. Esquema del interior de la góndola o “nacelle”.

Fuente: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. United States Department of Energy. (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EERE_illust_large_turbine_es.png)

Sobre el bastidor y desde el rotor hasta la parte posterior de la góndola, se sitúan los siguientes componentes:

Eje de baja velocidad

Esta pieza tubular de acero macizo es la encargada de conectar el buje del rotor con la multiplicadora y transmitir la energía captada por las palas. Es también conocido como eje principal por ser el nexo entre el rotor y la góndola.

Sistema de freno

El freno es un elemento utilizado para reducir la velocidad del rotor e incluso detenerlo en el caso de que la velocidad del viento sea demasiado elevada, evitando de este modo sobrecargas en el generador y un posible exceso de fuerza centrífuga en las palas.

Multiplicador

También conocido como caja de cambios, el multiplicador es un conjunto de engranajes que aumenta la velocidad de giro transmitida por el eje de baja velocidad, de forma que se adapte a las necesidades del generador. De este modo la velocidad a la que gira el eje del rotor

⁵¹ Mishnaevsky et al. (2017). *Materials for Wind Turbine Blades: An Overview*. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/11/1285>

(entre 10 y 30 rpm en el eje de baja velocidad⁵²) se incrementa posteriormente hasta las 1.500 rpm en el eje de alta velocidad que hace girar el generador.

El multiplicador está compuesto casi en su totalidad de acero, llegando a tener una masa aproximada de entre 8 y 20 toneladas⁵³ según el aerogenerador. Además, sus engranajes requieren estar perfectamente lubricados, por lo que el aceite en este y otros componentes mecánicos es un material a tener en cuenta durante el desmantelamiento.

Eje de alta velocidad

Es el encargado del accionamiento del generador eléctrico gracias al incremento de hasta 50 veces⁵⁴ la velocidad del eje principal, tras la acción del multiplicador.

Generador

El generador o alternador se encarga de transformar la energía mecánica obtenida a partir del giro del rotor en energía eléctrica. Esta energía se volcará a la red eléctrica o será usada por algún centro de consumo anexo a la instalación. Existen diferentes tipos de generador dependiendo del diseño del aerogenerador. Los más comunes son los generadores asíncronos de jaula de ardilla, los generadores asíncronos de rotor bobinado y, en menor medida, los generadores síncronos. En cualquier caso, estos componentes poseen una gran proporción de cobre por donde circula la corriente del circuito.

Sistema de control

Se trata de un ordenador electrónico utilizado para monitorizar todas las

variables de funcionamiento del aerogenerador a distancia. Se hace cargo del funcionamiento seguro y eficiente de todo el equipo controlando la orientación de la góndola, la posición de las palas y la potencia total entregada por el equipo, entre otros. Cualquier tipo de incidencia se ve reflejada en él, lo que permite tomar medidas prácticamente inmediatas.

Actualmente, los sistemas de control se basan en microprocesadores especialmente desarrollados para su uso en el control de aerogeneradores. Estos componentes electrónicos están fabricados casi en su totalidad por silicio debido a su capacidad semiconductora, actuando como aislante y de conductor de la electricidad, aunque también incorporan otros minerales como el aluminio, el cobre, el oro o el germanio. La suma de estos microprocesadores forma en conjunto un circuito electrónico capaz de realizar complejas operaciones.

Sistema de refrigeración

No solo la temperatura externa contribuye al calentamiento de la góndola, sino que el calor desprendido por los propios equipos puede hacer que el aerogenerador disminuya su rendimiento. Para evitar esta situación se instalan refrigeradores que enfrían el interior de la góndola de manera automática. Además de regular la temperatura, estos sistemas incluyen también deshumidificadores con los que se evita que la humedad pueda ocasionar problemas debidos a la acumulación de electricidad estática.

Sistema de orientación

Situada entre la parte inferior de la góndola y la parte superior de la torre, el sistema de orientación consiste en un conjunto de motores que se encargan de orientar toda la góndola de forma que el eje del rotor se sitúe en paralelo a la dirección del viento, presentando así la mayor superficie de captación posible.

Existen otra serie de componentes menores que pueden observarse en el exterior del aerogenerador, incluidos en la góndola, pero anejos externamente a la carcasa.

Anemómetro y veleta

Estas piezas metálicas se encuentran encima de la góndola con el propósito de medir la velocidad y dirección del viento, respectivamente. Ambos están conectados al sistema de control para analizar constantemente la información meteorológica y actuar en consecuencia.

Pararrayos

Ante los problemas que pudieran ocasionar la descarga de rayos en las palas, que pueden llegar a dañarlos seriamente o incluso incendiarlos, es fundamental que los aerogeneradores cuenten con sistemas de protección frente a este tipo de inclemencias. Estos instrumentos inhiben la formación del rayo en los alrededores a la estructura del aerogenerador, debilitando el campo magnético presente.

Luces de gálibo

Como cualquier estructura de cierta altura, las dimensiones de un aerogenerador requieren que vaya equipado de una baliza de señalización mediante una luz de gálibo que determine su posición y altura en ausencia de luz natural.

4.3 Torre y cimentación

La torre es una construcción rígida, normalmente de entre 25 y 100 metros de altura, que soporta la góndola y, por ende, el rotor. Su función es la de situar el generador a la altura deseada para aprovechar la velocidad del viento, además de permitir el radio de giro de las palas. En los grandes aerogeneradores las torres son estructuras tubulares de acero en la mayoría de los casos, aunque también pueden encontrarse torres de celosía, de hormigón o mixtas⁵⁵.

Las torres de acero se dividen en secciones tubulares tronco-cónicas de altura variable (entre 20 y 30 metros por lo general)⁵⁵ cuyo diámetro crece según se aproxima a la base. Estas secciones están ensambladas una encima de otra mediante bridas en cada uno de los extremos (figura 8).



Figura 8. Construcción de la torre de un aerogenerador a partir de secciones tubulares de acero.

Fuente: Paul Anderson (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Attaching_the_top_section_of_Turbine_No_17_-_geograph.org.uk_-_829677.jpg)

⁵² Agencia Andaluza de la Energía (2019). *Energía eólica*. Disponible en: https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/eolica_20191022_a3.pdf

⁵³ Endesa (2021). VI congreso eólico español. Taller de Economía Circular.

⁵⁴ Fundación Endesa (2012). *Parque eólico*. Disponible en: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/parque-eolico>

⁵⁵ Danish Wind Industry Association. *Torres de aerogeneradores*. Disponible en: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/tower.htm>

Una variante de las torres de acero son las torres de celosías que, pese a estar constituidas del mismo material, son fabricadas utilizando un entramado de perfiles de acero con el que se reduce la cantidad de metal. Pese a ello, este tipo de torres no es la opción deseable a la hora de construir grandes aerogeneradores.

Por otra parte, en los últimos años han surgido nuevos modelos de torres fabricadas con hormigón. Las ventajas físicas del este material, la reducción en los costes de su fabricación y mantenimiento y su mayor vida útil, entre otros, han impulsado que cada vez más empresas del sector se interesen en estudiar el uso este tipo de torres en detrimento de las torres tradicionales de acero⁵⁶.

Dentro de la torre se encuentran además los siguientes componentes:

Escalera de acceso

Para garantizar las labores de mantenimiento es necesaria una escalera para acceder a la góndola. Algunos aerogeneradores modernos y de gran tamaño incorporan ascensor, pero lo normal es que se utilice la escalera que hay en el interior de la torre.



Figura 9. Esqueleto armado de una cimentación anclada.
Fuente: Störfix (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WEA-Fundament.jpg>)

Transformador

El transformador se sitúa generalmente en la base de la torre con el propósito de reducir el tamaño y peso de la góndola, no obstante, puede ubicarse dentro de ésta si se requiere compensar el peso del rotor. La función del transformador consiste en modificar el voltaje de salida del generador eléctrico a un voltaje adecuado para poder transportar la electricidad hasta la red eléctrica.

Cimentación

La cimentación actúa como soporte del aerogenerador y, en el caso de aerogeneradores terrestres, se trata de una zapata de hormigón con forma cuadrada, hexagonal o circular, que permite transmitir al suelo las cargas que va a soportar la estructura. Las cimentaciones suelen ser poco profundas y de gran superficie. En el caso de que se considere que la rigidez del terreno es adecuada, bastará con disponer la zapata de hormigón y anclar la torre a ella mediante un tubo embebido o un sistema de anclaje mediante conectores de acero (figura 9).

4.4 Materias primas fundamentales presentes

Como ya se ha comentado en los apartados anteriores, los aerogeneradores están compuestos por un elevado número de materiales que les confieren propiedades

características. Algunos de estos materiales pueden recuperarse del reciclado de otros compuestos, pero otros, de momento solo pueden extraerse del medio natural. Según el “Estudio de la revisión de 2020 de la lista de materias primas críticas”⁵⁷ publicado por la Comisión Europea, de las 61 materias primas evaluadas, 30 fueron identificadas como críticas (tabla 4).

Materias primas críticas 2020			
Antimonio	Elementos de tierras raras pesadas (ETRL o LREEs): Cerio, lantano, neodimio, praseodimio, samario	Germanio	Niobio
Barita	Elementos de tierras raras pesadas (ETRP o HREEs): Disprosio, erbio, europio, gadolinio, holmio, lutecio, terbio, tulio, iterbio, itrio	Grafito natural	Silicio metal
Bauxita	Escandio	Hafnio	Tantalio
Berilio	Estroncio	Helio	Titanio
Bismuto	Fluorita	Indio	Vanadio
Borato	Fosfatos	Litio	Wolframio
Caucho natural	Fósforo	Magnesio	
Cobalto	Galio	Metales del grupo del platino (MGP): Iridio, platino, paladio, rodio, rutenio	

Tabla 4. Materias primas consideradas críticas en 2020.
Fuente: Comisión Europea (2020)⁵⁷.

La criticidad de un material atiende a su capacidad de suministro y a su valor económico. De entre todas las materias críticas identificadas, aquellas con una mayor importancia, o mayor criticidad en la fabricación de aerogeneradores son el neodimio, el praseodimio, el boro, el disprosio y el niobio⁵⁸. El neodimio, el praseodimio y el disprosio pertenecen al grupo de las tierras raras, un grupo esencial para el funcionamiento de las tecnologías de hoy en día, al igual que el semiconductor boro, mientras que el niobio se emplea principalmente en las aleaciones de acero para conferir una mayor resistencia.

La disponibilidad y el valor de las materias primas críticas es uno de los problemas a los que se enfrentan los aerogeneradores pues, aunque alguna de las citadas materias primas críticas no se utiliza directamente para la fabricación, sí son necesarias para determinados componentes que se encuentran en las piezas, por

lo que la falta de éstas puede afectar a la producción de los aerogeneradores. Además, la utilización de estos materiales no se extiende únicamente a las palas, sino que todos los componentes pueden verse comprometidos.

El origen de estas materias primas críticas es el factor determinante a la hora de establecer su criticidad, ya que la mayoría se encuentra fuera de Europa, en países en vías de desarrollo o subdesarrollados.

Otra de las preocupaciones claves en la disponibilidad de los materiales en el futuro es su abundancia y facilidad de acceso. A menudo los materiales denominados críticos se presentan como subproductos de la minería de metales básicos como el zinc del que se obtiene el indio. En estos casos ocurre que si no es rentable o no hay demanda para los productos principales, la producción de los subproductos se verá reducida. Soluciones a este problema pueden venir de avances

⁵⁶ Apcarian, A. & Lässi, J.L. (2012) *Tendencias en el diseño de las torres para aerogeneradores Multimegawatt*. Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires. Disponible en: <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/cliv2/public/actas%20congreso/20.Apcarian.CLIV2.pdf>

⁵⁷ Comisión Europea (2020). *Study on the EU's list of Critical Raw materials*. Disponible en: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM_2020_Report_Final.pdf
⁵⁸ JRC (2017). *Materials impact on the EU's competitiveness of the renewable energy, storage and e-mobility sectors: Wind power, solar photovoltaic and battery technologies*. Disponible en: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC108356>

tecnológicos que mejoren significativamente la tasa de reciclado de estos materiales críticos, pues a día de hoy, en la mayoría de los casos no existen compuestos capaces de sustituirlos.

Las exportaciones de estos materiales están por lo tanto sujetas a la volatilidad de los mercados, la geopolítica y las características de los países productores (figura 10), pudiendo perjudicar, en algunos momentos, e incluso llegar a ralentizar el desarrollo del sector eólico.

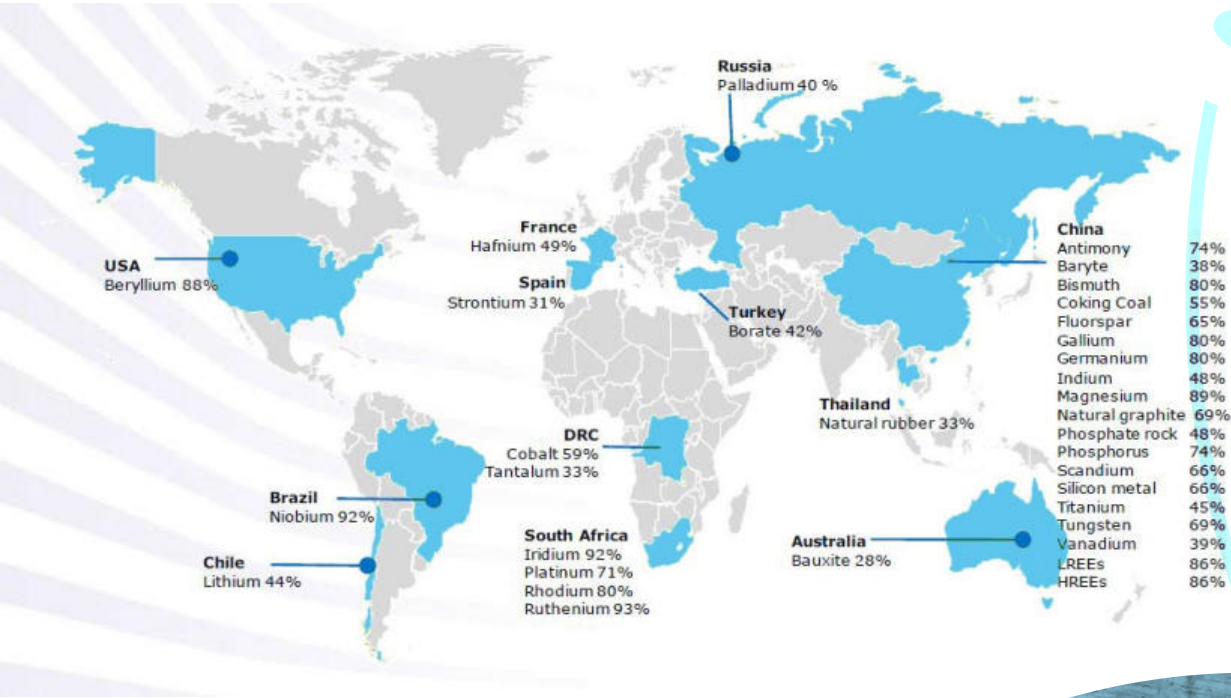


Figura 10. Países que representan la mayor parte de la oferta global de materias primas críticas.
Fuente: Comisión Europea (2020)⁵⁷.

Con el fin de conocer y establecer qué materias son susceptibles de considerarse materias primas críticas, la Asociación Empresarial Eólica (en adelante, AEE) ha desarrollado un listado con todas las materias primas fundamentales que se emplean en la fabricación de las partes que conforman los aerogeneradores. En dicho listado se muestran los compuestos que se utilizan en los aerogeneradores, bien sea en sus partes principales o en los componentes que permiten que funcione correctamente, como cables; componentes electrónicos; etc. (véase [anexo I](#)). ■



BUENAS PRÁCTICAS PARA EL FIN DE VIDA DE UN PARQUE EÓLICO

Tal y como se expone en la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética⁵⁹ para el año 2030 se han planteado como objetivos que el 42 % de la energía destina a consumo final sea de origen renovable y el 74 % del sistema eléctrico debe producirse mediante energía renovable. Esto es importante para el sector eólico, ya que según propone el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030² en España, para el año 2030 está previsto que, de 161 GW de potencia total instalada en el sector eléctrico, 50 GW le correspondan a la eólica, lo que le convierte en la primera fuente de generación de electricidad. Esto supone un problema para el sector eólico actual, ya que con el paso de los años un mayor número de aerogeneradores llegará al final de su vida útil, lo que puede comprometer que se alcancen los objetivos mencionados anteriormente.

Por este motivo es necesario desarrollar alternativas al fin de la vida útil para aquellos aerogeneradores que se encuentren en buenas condiciones y puedan seguir funcionando algunos años más. A continuación, se exponen una serie de buenas prácticas para su aplicación en el sector eólico.

5.1 Extensión de vida útil de los aerogeneradores

Antes de comenzar con este punto es necesario establecer cuál es la definición de vida útil. Según el “Documento del grupo de trabajo de extensión de vida útil” de la AEE⁶⁰ se define vida útil como el periodo de tiempo en el que una máquina conserva su integridad física, manteniendo su capacidad operativa y desempeñando la función para la que ha sido diseñada y fabricada. En el caso de los aerogeneradores, este término se basa en tres características: integridad física (estructural, mecánica y eléctrica), funcionalidad (producción de electricidad al coste que estaba previsto) e irreversibilidad (inexistencia de soluciones económicamente viables que permitan recuperar la integridad física o funcional del aerogenerador).

Cuando los aerogeneradores llegan al final de la vida útil obtenida a partir de estas características existen dos opciones, o se produce una repotenciación de los mismos y, en el caso de que esto no sea posible, se desmantelan; o se opta por la extensión de la vida útil. Siempre y cuando las reparaciones necesarias sean económicamente rentables y requieran únicamente de un breve periodo de tiempo de inactividad, se optará por la segunda opción, ya que esto permitirá alargar la vida útil y reducirá la cantidad de residuos producidos, lo que evitará unos costes excesivos para la empresa encargada de la explotación del parque eólico.

5.1.1 Elementos críticos de un aerogenerador

A la hora de evaluar la vida útil de los aerogeneradores, o la posibilidad de extender la misma cuando éstos se encuentran en buenas condiciones, es necesario realizar una serie de acciones que aseguren que todos los componentes

se encuentran en óptimas condiciones o que, con la reparación, actualización o sustitución de ciertos componentes, sea posible continuar con la actividad.

Para ello se realiza un examen que pretende valorar el estado actual del aerogenerador, el cual constará de dos partes: una evaluación de tipo analítica en la que, a partir de los datos y documentación existente se puede calcular la duración potencial de la actuación para todas las partes del aerogenerador; y una evaluación práctica del propio aerogenerador que permita documentar los posibles daños que existan en el generador o cualquier cambio en el entorno.

Los principales elementos en los que se centran las inspecciones son aquellos que soportan cargas y aquellos que contribuyen a la estabilidad estructural del aerogenerador⁶¹. A continuación se detalla una lista con las piezas susceptibles de ser cambiadas⁶²:

– **Torre y cimentación:** una de los primeros criterios que hay que revisar durante la inspección es la estabilidad del aerogenerador, ya que es

necesario evaluar las tensiones y cargas reales a las que ha estado sometido durante su vida útil para comprobar que puede seguir funcionando sin que la estructura se vea condicionada.

– **Tornillos y pernos:** se trata de pequeños elementos que se encuentran sometidos a vibraciones casi constantes y que resisten una elevada carga. En el caso de los pernos, son partes de las palas, lo que hace que estén sometidos a una presión continua que produce un mayor desgaste, por lo que son una de las partes más susceptibles de revisar y sustituir a la hora de alargar la vida útil de los aerogeneradores. En muchos casos, estas partes son sometidas a reemplazamientos preventivos que aseguren las uniones y su correcto funcionamiento.

– **Buje:** Debido a que es una de las piezas que se encuentra constantemente en movimiento, es normal que sea una de las que más desgaste sufre, por lo que es recomendable su revisión o sustitución para aumentar la vida útil del aerogenerador.



⁵⁹ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2021/BOE-A-2021-8447-consolidado.pdf>

⁶⁰ AEE (2020). Documento grupo de trabajo de extensión de vida.

⁶¹ Future Energy (abril-mayo 2020) Artículo. *Evaluación del envejecimiento de los aerogeneradores para extensión de vida*. Disponible en: https://futureenergyweb.es/wp-content/uploads/2020/06/FutureEnergy_Abril20_43-46_tuv-sud.pdf

⁶² Cumbre pueblos (2019) Artículo. *Aerogeneradores. Qué son, cómo funcionan, tipos*. Disponible en: <https://cumbrepuebloscop20.org/energias/eolica/aerogeneradores/>

- **Palas:** las palas son uno de los compuestos que más daños sufren al estar expuestos a las condiciones climáticas y ser uno de los elementos con más uso de todo el aerogenerador. En algunas ocasiones es necesario sustituir algunas partes que están dañadas.
- **Sistemas de frenado:** estos sistemas están diseñados para frenar el aerogenerador cuando las condiciones climáticas no son las favorables o cuando alguno de los componentes críticos no funciona correctamente, evitando averías de mayor consideración, por lo que pueden sufrir un elevado desgaste. Cuentan con un elevado número de sensores que detectan cualquier incidencia, desde el sobrecalentamiento del aerogenerador hasta la protección contra la elevada velocidad del viento. El fallo de este sistema puede ocasionar problemas más graves, puesto que los aerogeneradores pueden girar sin ningún tipo de control, llegando a colapsar en los casos más graves. Para una vida útil de 20 años está estimado que se realicen entre 500 y 1000 paradas de emergencia, por lo que es recomendable revisar este componente con especial atención antes de ampliar la vida útil⁶³.
- **Multiplicadora:** esta parte es una de las críticas, ya que se encuentra constantemente en movimiento y puede tener fallos por desgastes derivados

de la operación, o como consecuencia de la fatiga de los componentes o por contaminación externa (aire, agua o partículas de polvo, entre otros). Este es uno de los componentes que es necesario revisar con especial cuidado a la hora de ampliar la vida útil del aerogenerador, puesto que un fallo de este elemento puede suponer elevados costes económicos para su reparación o sustitución de piezas, lo que puede hacer más rentable la sustitución completa del aerogenerador por otro más moderno y de mayor potencia, o el desmantelamiento completo del mismo⁶⁴.

- En algunas ocasiones el eje principal, la corona de *yaw* (sistema encargado del giro del aerogenerador para adaptarse a la dirección del viento) y el *axle pin* (componente eléctrico) pueden generar problemas que dificulten el trabajo del aerogenerador, pero no suele ser habitual centrarse en esas partes.

El resto de componentes no tiene la categoría de crítico, puesto que son sustituibles durante las tareas de habituales de mantenimiento. No obstante, es necesario revisar todos para evitar que se produzcan fallos sistémicos que puedan afectar al conjunto de la flota del parque.

5.1.2 Estudios de diagnosis

En general, no suele estar disponible demasiada información acerca de proyectos basados en la extensión de vida útil de los aerogeneradores o de alguno de sus componentes, ya que muchos de ellos se encuentran todavía en fase de investigación y están íntimamente relacionados con las patentes de diseño.

En el informe “Economía circular en el sector eólico. Palas de aerogeneradores”¹⁰ elaborado por la AEE en 2021 y centrado específicamente en las palas, se aconseja que se estudien tres posibles soluciones:

1. Utilización de polímeros autorreparables. Esta sustancia se aplicaría sobre las palas que requieran un mantenimiento mínimo para la reparación de microgrietas y roturas que puedan afectar al funcionamiento del mismo. Actualmente esta solución se encuentra en fase de investigación y no está disponible en el mercado.
2. Mejora de la resistencia a la fatiga, la ductilidad y la adhesión de la fibra-resina. La mejora de estos compuestos hace que los materiales sean más resistentes y que aguanten más las condiciones más desfavorables, lo que reducirá el número de reparaciones.
3. Centrándonos nuevamente en las palas, algunas empresas como Aerox han desarrollado *gelcoats* y revestimientos superficiales que permiten proteger la superficie de las palas del aerogenerador, lo que evita que se produzcan roturas o grietas por impacto o desgaste. El uso de estos recubrimientos es una práctica habitual en la actualidad y está disponible para cualquier operador.

En el documento del grupo de trabajo de extensión de vida de AEE⁶⁰ se recomienda que las posibles soluciones que se lleven a cabo tengan en cuenta la situación económica del promotor, es decir, que se apliquen en función del gasto económico que suponen las reparaciones y el valor añadido que puedan asumir cada uno de ellos. Para ello, se proponen las siguientes cinco acciones:

1. **Estudio teórico de consumo de vida útil.** Esta acción se realizaría entre los 10 y 15 años de operación del aerogenerador para ver el estado de los componentes y hacer una estimación de su vida útil.
2. **Campana de inspección y ensayos y focalización de puntos críticos resultantes de estudio o experiencia.** En el caso de la campaña, es necesario llevarla a cabo en los años próximos al fin de la vida útil del aerogenera-

dor que se hayan estipulado el estudio anterior, mientras que la focalización de puntos críticos es recomendable realizarlo antes del año 18 de operación.

3. **Plan de mantenimiento específico.** Esta acción es recomendable efectuarla antes y después de la realización del estudio teórico, ya que permite adaptarse a las necesidades de cada aerogenerador o parque eólico.
4. **Planificación de sustitución/reparación de componentes e implementación de monitorizaciones.** Esta acción se realiza una vez que se han obtenido los resultados del estudio e inspección, ya que se habrán detectado los componentes que es necesario sustituir, haciendo más efectivos los trabajos.
5. **Sustitución o reparación de componentes.** Una vez que se dispone de la información completa se iniciará la sustitución o reparación de los componentes. La elección de una u otra acción dependerá del resultado del informe indicado en el punto 1 y del presupuesto del que se disponga.

Estas fases se pueden realizar a un aerogenerador en particular o a todo el conjunto del parque eólico, aunque esto aumenta considerablemente los costes. Como alternativa, algunos parques eólicos optan por realizar el análisis a un determinado número de aerogeneradores elegidos aleatoriamente y extrapolar los resultados al resto de aerogeneradores que conforman el parque eólico, ya que se estima que las afecciones sufridas serán similares en todos los equipos.

Otra forma de incrementar la vida útil de los aerogeneradores es a través de la monitorización de los componentes mediante la utilización del *big data* y otro tipo de programas informáticos. Esto permite realizar un seguimiento en tiempo real de todos los componentes y predecir el posible desgaste o la vida útil de los mismos⁶⁵.

Algunas empresas, como Siemens Gamesa disponen de un programa de extensión de vida centrado en el análisis de fatiga y la reingeniería de los componentes estructurales de los generadores de menor

⁶³ Izanda (2021). Reparación pistas frenado aerogenerador. Disponible en: <https://www.izanda.com/repára-frenos-aerogenerador/>

⁶⁴ Attend2 (2018). Artículo. ¿Cómo puede afectar el estado de la multiplicadora en la vida útil de un aerogenerador? Disponible en: <https://blog.attend2.com/%C3%B3mo-puede-afectar-el-estado-de-la-multiplicadora-en-la-vida-%C3%BAtil-de-un-aerogenerador>

⁶⁵ Siemens Gamesa (2022). Servicios de diagnóstico. Disponible en: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/service-wind/servicios-dediagnostico>

potencia, el cual se combina con el sistema de monitorización y diagnóstico para la detección temprana de comportamientos anómalos como consecuencia del desgaste acumulado en algunos componentes, lo que permite hacer un seguimiento en tiempo real y saber cuál es el estado real de los aerogeneradores y si es posible extender su vida útil en el tiempo⁶⁶.

Otros programas que realizan en Siemens Gamesa es el Programa *Overhaul*, el cual se encuentra englobado dentro del programa de extensión de vida

citado anteriormente y consiste en la renovación de componentes eléctricos y electrónicos de las turbinas antiguas, lo que permite mejorar los aerogeneradores disponibles e incrementar la producción de energía eléctrica hasta en un 10 %⁶⁷.

Todas estas técnicas están enfocadas en la reducción de generación de residuos y en la aplicación de la jerarquía de residuos que se indica en la legislación a nivel nacional y europeo (figura 11).



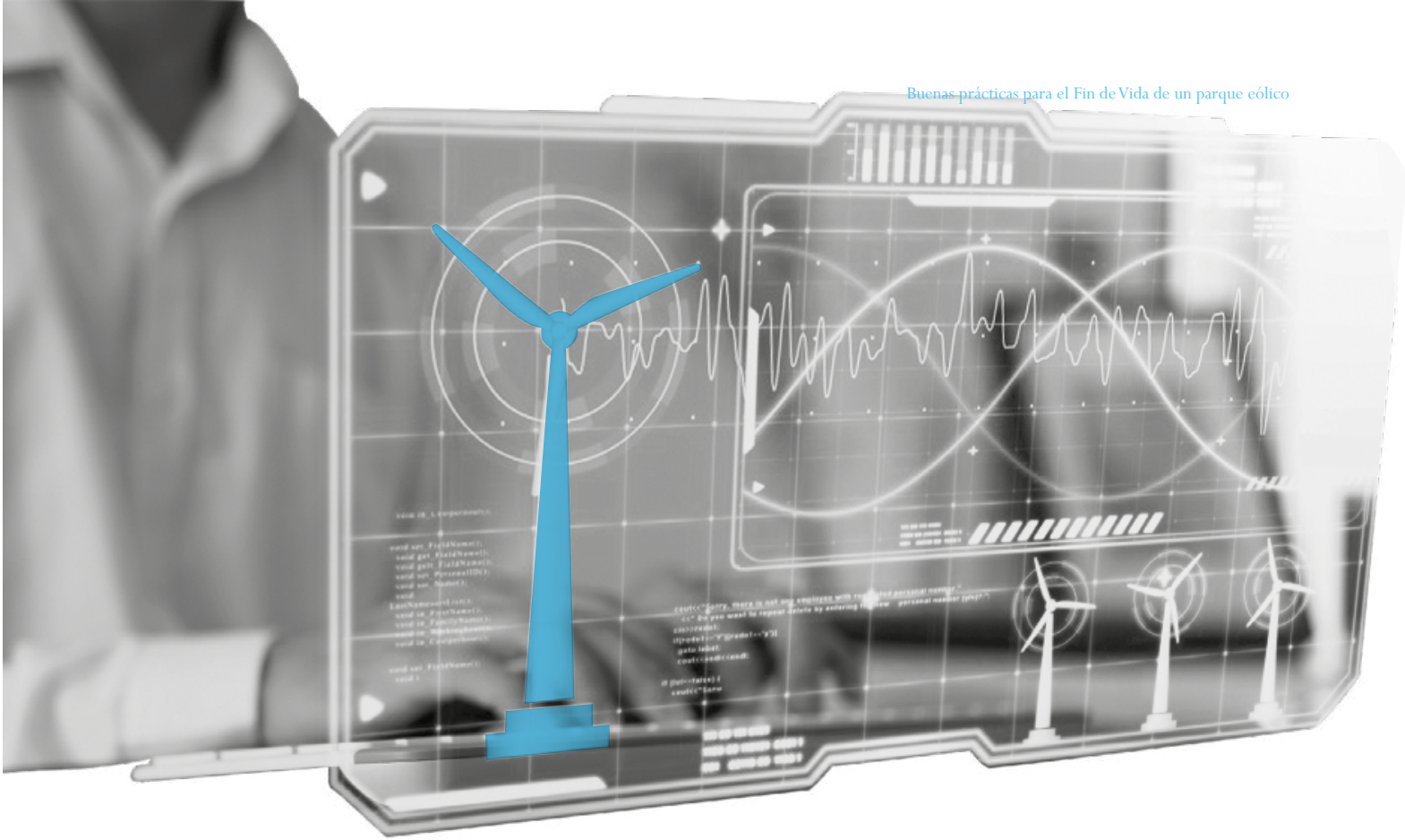
Figura 11. Esquema de la jerarquía de residuos aplicado a la gestión de residuos del sector eólico.
Fuente: elaboración propia a partir de ETIPWind (2019)⁶⁸.

5.1.3 Ventajas e inconvenientes

Las operaciones de extensión de vida útil permiten aumentar el tiempo de utilización de los aerogeneradores con una inversión reducida, puesto que los fallos que se pueden encontrar son de pequeña índole y

con unas reparaciones mínimas es posible mantener el funcionamiento de los mismos entre 5 y 10 años más de lo previsto inicialmente⁶⁶. Esto supone una ventaja para el propietario del parque eólico, ya que puede aprovechar la inversión inicial y sacarle más rendimiento del que estaba previsto inicialmente, lo que

⁶⁶ Siemens Gamesa (2022). *Proyecto Extensión de vida aerogeneradores*. Disponible en: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/service-wind/life-extension>
⁶⁷ Siemens Gamesa (2022). *Proyecto Overhaul*. Disponible en: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/service-wind/life-extension>
⁶⁸ ETIPWind (2019). *How Wind Is Going Circular Blade Recycling*. Disponible en: https://etipwind.eu/files/reports/ETIPWind-How-wind-is-going-circular-blade-recycling.pdf?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc



resulta ser más ventajoso al reducir los costes operativos y evitar la obsolescencia de las piezas, puesto que la introducción de nuevas piezas más modernas permite que el aerogenerador esté en constante actualización y no existan problemas de falta de piezas o que éstas se encuentren descatalogadas.

Otra ventaja que supone la implantación de este procedimiento es la reducción de los residuos generados al no ser necesario desechar componentes de gran tamaño, lo que reduce los costes de tratamiento de residuos y la compra de nuevos componentes. Además, la posibilidad de utilizar componentes de segunda mano podría abaratar aún más los costes de esta operación, lo que favorecería el llevar a cabo la misma.

También algunas de las empresas que se dedican a la fabricación de aerogeneradores ofrecen programas de revisión de estructuras o componentes, asegurando la extensión de vida útil por un periodo de 10 años, lo que puede animar a los propietarios de los parques eólicos a optar por esta opción.

Otra ventaja que se deriva de este proceso es que actualmente la legislación se va actualizando para tener en cuenta este procedimiento a la hora de adjudicar proyectos de implantación de parque eólicos y facilita los trámites administrativos. Un ejemplo de esto es Real Decreto-ley 23/2020, de 23 de junio, por

el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos de la reactivación económica³⁸ en el cual se concreta la modificación no sustancial, mediante la cual no es necesario solicitar una nueva autorización administrativa siempre y cuando no se supere la potencia establecida en un 5 % y no sea necesario solicitar una nueva evaluación de impacto ambiental por cualquier otro motivo.

En contraposición, la extensión de vida útil es un procedimiento que actualmente no se realiza por la mayoría de los propietarios de los parques eólicos, ya que conlleva unos gastos elevados de recambios que, en algunos casos, no son asumibles. Este es el caso de los pequeños y medianos promotores, puesto que los gastos que supone la ampliación de vida no repercute en exceso sobre los beneficios que reportan.

Por último, este proceso se aplicaría a los parques más antiguos, ya que son los que se encuentran próximos al final de la vida útil, pero son los que se encuentran en las mejores zonas para aprovechar el viento, por lo que no compensa la inversión en equipos que poseen una potencia menor a la que actualmente se emplea en el mercado, por lo que en muchas ocasiones se opta por la sustitución de los aerogeneradores por otros más modernos en lugar de invertir en la extensión de la vida útil de los activos de los que se dispone actualmente.

5.2 Repotenciación del parque eólico

5.2.1 Situación actual y potencial de repotenciación eólica en España

En España, según el estudio “Fomento de la repotenciación de los parques eólicos” de la AEE¹⁵ había 1.203 parques eólicos en 2020, lo que supone 20.940 aerogeneradores. De estos se estima que un 36 % tienen 15 años o más, lo que indica que aproximadamente un tercio

del parque eólico español tiene, al menos, 15 años de antigüedad. Esto es indicador de que los componentes empleados se encuentran desactualizados y no cuentan con las últimas tecnologías disponibles, lo que hace que no pueda aprovecharse al máximo el potencial de esos parques eólicos.

Tal y como se observa en la figura 12, los parques eólicos están llegando al final de su vida útil marcada por el fabricante prevista, ya que la previsión para 2025 es que la mayor parte de la potencia generada se realice por aerogeneradores que tienen 15 años o más, aumentando el número de los parques eólicos con una antigüedad de 25 años.

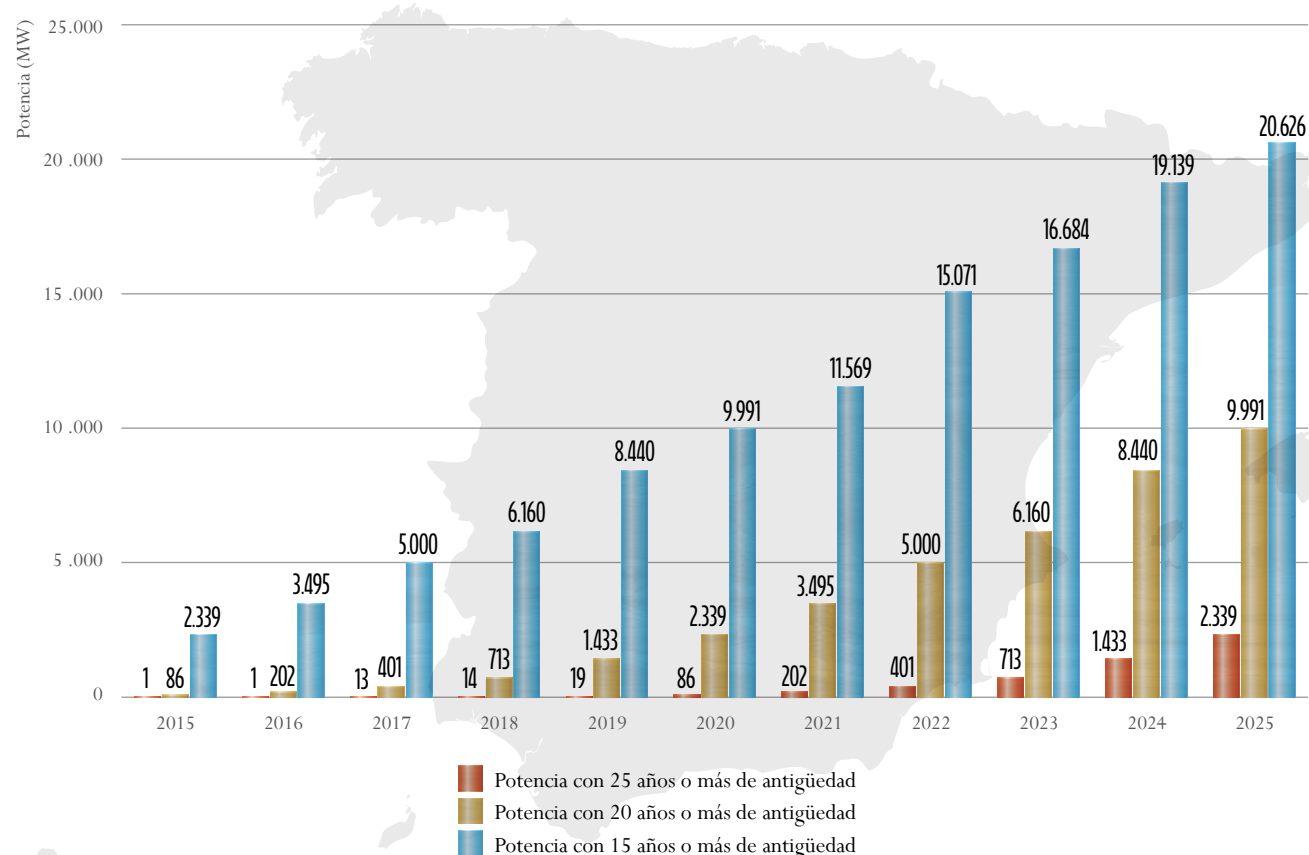


Figura 12. Evolución de la antigüedad del parque eólico en España.
Fuente: elaboración propia a partir de AEE (2019)¹⁵.

Para paliar los efectos de este envejecimiento existen diversas técnicas, como la ya comentada extensión de vida útil, o la repotenciación, especialmente indicada para los parques eólicos más antiguos, puesto que son los que disponen de mejor recurso eólico al haber sido los primeros parques en ser construidos.

Este concepto está siendo poco a poco introducido en España a través de programas de ayudas, como

el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia o la inclusión del concepto de repotenciación en la legislación. Un ejemplo de esto es el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial³⁹, donde se hace mención a la repotenciación. La disposición transitoria séptima plantea la repotenciación como una modificación sustancial cuyo objeto sea la sustitución de aerogeneradores

por otros de mayor potencia, en unas condiciones determinadas para las instalaciones eólicas con fecha de inscripción definitiva anterior al 31 de diciembre de 2001. Esta disposición limita la potencia susceptible de repotenciación a 2.000 MW adicionales a la potencia previa instalada e indica que las instalaciones deben estar adscritas a un centro de control de generación y deben disponer de los equipos técnicos necesarios para contribuir a la continuidad de suministro frente a los huecos tensión.

Gracias a estos impulsos y a la iniciativa privada, en España ya se han comenzado a realizar repotenciaci-ones de varios parques eólicos. La AEE recopiló en su Anuario 2020⁶⁹ las repotenciaci-ones que se han reali-zado hasta la fecha, las cuales son:

- **Repotenciación del parque de Cabo Vilano (La Coruña)** gestionado por Naturgy. En septiembre de 2016 se sustituyeron 22 aerogeneradores (20 de 180 kW y 2 de 100 y 200 kW, con un total de 3,9 MW) puestos en funcionamiento en 1991 y 1992 por 2 turbinas eólicas de 3MW de potencia unitaria y una potencia máxima evacuable de 5,46 MW. La inversión de esta repotenciación supuso 7,6 millones de €⁷⁰.
- **Repotenciación del parque eólico de Malpica y Ponteceso (La Coruña)** del que Grupo Elecnor es el propietario. Para este proceso, realizado a lo largo de 2017, se sustituyeron 69 turbinas eólicas por 7 turbinas nuevas con una potencia de 16,5 MW capaces de producir el doble de electricidad (hasta 66 GWh al año), lo que permitió mantener la potencia del parque reduciendo la superficie afectada, pasando de 3,2 a 1,9 hectáreas. Para esta repotenciación la inversión realizada fue de 22 millones de € y la empresa encargada de la retirada de los equipos, Surus Inversa, S.L., se comprometió a la venta de los componentes en el mercado secundario, permitiendo dar una segunda vida a todos los elementos retirados⁷¹.

– **Repotenciación del parque de El Cabrito (Cádiz)** gestionado por Acciona. En 2019 se llevó a cabo la renovación de un parque de 90 aerogeneradores de 330 kW de potencia unitaria, que sumaban 29,7 MW, puesto en marcha en 1995. Tras la repotenciación el nuevo parque prácticamente conservó su potencia (la nueva potencia producida es de 30 MW), pero redujo el número de turbinas a 12 (8 turbinas de 3 MW y 4 de 1,5 MW), incrementando la producción un 16 % por la mayor eficiencia y disponibilidad de los equipos⁷².

– **Repotenciación de los parques eólicos Zas y Corme (La Coruña)** gestionados por EDP. En este caso la empresa propietaria del parque sacó a licitación el desmantelamiento de los mismos tras más de 20 años funcionando, encargo que fue acometido por Surus Inversa, S.L. La operación consistió en la desinstalación, acondicionamiento y venta de 141 aerogeneradores (80 provenientes del parque de Zas y 61 del parque de Corme) de 300 kW cada uno, así como de la desinstalación de 9 torres de medición y 43 centros de transformación. En los propios parques se instalaron 17 aerogeneradores que permitieron mantener la potencia total de 42,3 MW que se producía antes. La venta de estos componentes se realizó mediante subasta internacional a través de la página web escrapalia.com, lo que permitió llegar a un mercado más amplio⁷³.

– Por último, el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER) de Canarias tiene tres parques eólicos en proceso de repotenciación⁷⁴:

- **Plataforma experimental de 2,83 MW.** Este parque consiste en un proyecto financiado en colaboración con diversos organismos (ITER, Cabildo de Tenerife, Gobierno de Canarias, UNELCO y Unión Europea), cuyo principal objetivo es el estudio del funcionamiento de diferentes tipos de aerogeneradores, tanto por potencia como por fabricación,

⁶⁹ AEE (2020) *Anuario eólico 2020*. Disponible en: <https://www.aeeolica.org/anuario/2020/#p=51>

⁷⁰ Cuadernos de energía (2017). Artículo *Parque eólico Cabo Vilano, primera repotenciación en Galicia de uno de los primeros parques eólicos gallegos*. Disponible en: https://www.enerclub-pre.enerclub.es/wp-content/uploads/2017/04/ce_n51_07_parqueeolicocabovilano.pdf

⁷¹ Surus Inversa, S.L. *Casos de éxito. Parque eólico de Malpica*. Disponible en: <https://www.surusin.com/caso/parque-eolico-malpica/>

⁷² Acciona (2019). *Parque eólico El Cabrito*. Disponible en: <https://www.acciona.com/es/proyectos/parque-eolico-el-cabrito/?adin=01833301559>

⁷³ Surus Inversa, S.L. *Desmantelamiento de los parques eólicos Zas y Corme*. Disponible en: <https://www.surusin.com/caso/parques-eolicos-de-zas-y-corme/>

⁷⁴ Instituto Tecnológico y de Energías Renovables de Canarias. *Parques eólicos*. Disponible en: <http://propietarios.iter.es/instalaciones/eolico.html#pe48>

procedencia y tecnología. La potencia nominal total de esta plataforma es de 2,83 MW y está formada por 9 aerogeneradores diferentes, instalados entre 1990 y 1993, cuyas potencias varían entre 150 y 500 kW. La tecnología empleada es diferente para cada uno de ellos, contando con turbinas de eje horizontal y de eje vertical, de paso fijo y de paso variable y generadores asíncronos y síncronos, así como variaciones en el diámetro y en la altura de los aerogeneradores. En su lugar se prevé la instalación de un solo aerogenerador de 2.000 kW de potencia nominal.

- **Parque eólico de 4,8 MW.** El Parque Eólico de 4,8 MW fue instalado en 1996 por la Asociación de Interés Económico “EÓLICAS DETENERIFE”, el cual contaba, inicialmente con 16 aerogeneradores de 300 kW de potencia cada uno, los cuales fueron sustituidos por 8 aerogeneradores de 600 kW cada uno en el mismo territorio en el que se encontraban los anteriores generadores en

el año 1999. En 2007 se solicitó, mediante autorización administrativa y aprobación del proyecto para la repotenciación del Parque Eólico Granadilla III mediante la sustitución de estos aerogeneradores por 4 aerogeneradores con una potencia de 1,2 MW cada uno.

- **Parque eólico Enercon, de 5,5 MW.** El Parque eólico de 5,5 MW es un proyecto autofinanciado por ITER e instalado en 1998, que está formado por 11 aerogeneradores de 500 kW de potencia nominal, contando cada uno con su propia estación transformadora. Está prevista la sustitución de estos equipos por 5 aerogeneradores de 2 MW cada uno, lo que incrementará la potencia instalada a 9,75 MW.

Cabe destacar que, en la mayoría de las repotenciones realizadas, la empresa encargada del desmantelamiento del parque se comprometió a la venta de las piezas que se encontraban en buenas condiciones en un mercado secundario de piezas donde son aprovechadas por parques eólicos de otros países, ampliando así aún más la vida útil de las piezas.

5.2.2 Repotenciación parcial o total

A la hora de llevar a cabo una repotenciación de los parques eólicos existen dos posibilidades: que se sustituyan todos los componentes del aerogenerador, lo que conlleva la demolición completa y el remplazo íntegro del aerogenerador en ese mismo emplazamiento, o la sustitución de determinados componentes clave del aerogenerador y el mantenimiento de los cimientos y la mayor parte de la torre.

El primer caso se denomina repotenciación total, puesto que no se mantiene ninguna pieza del anterior aerogenerador, mientras que el segundo caso se considera repotenciación parcial. Los principales compuestos que se sustituyen en la repotenciación parcial son las palas, el buje y algunas partes de la góndola. Esto se debe a que son las partes que han sufrido un mayor desarrollo tecnológico para generar mayor potencia.

La necesidad de repotenciar los parques eólicos conlleva una elevada complejidad, ya que es necesario tener en cuenta criterios de tipo económico, técnico y legislativo, por lo que resulta necesario evaluar cada caso en particular. Como se ha comentado en los apartados anteriores, la repotenciación debe iniciarse con los parques eólicos con una antigüedad superior

a los 15 años, puesto que son los que pueden verse más beneficiados con este cambio al disponer de una tecnología más antigua y disponen de los mejores emplazamientos, por lo que sería necesario iniciar la repotenciación lo antes posible.

En el caso de los parques eólicos de antigüedad entre 10 y 15 años puede resultar interesante la repotenciación de los mismos, puesto que la inversión inicial ya ha sido amortizada y es posible su utilización como aerogeneradores de segunda mano ya que la vida útil de los mismos se puede ampliar hasta los 20-25 años, lo que puede reportar un beneficio al vender los mismos en los mercados secundarios de componentes de aerogeneradores.

Para los parques de antigüedad inferior a 10 años o los aerogeneradores de potencia superior a 75 kW es recomendable esperar hasta un mayor desarrollo de la tecnología o hasta que se produzca un abaratamiento de los costes que permita amortizar la inversión realizada, por lo que se recomienda esperar un periodo de al menos 5 años para llevar a cabo esta operación.

El procedimiento de repotenciación consiste en los siguientes pasos:

1. Realización de un estudio inicial en el que se evalúan todos los factores que van a intervenir en la repotenciación. La memoria estará conformada por tres apartados: uno describiendo las condiciones actuales del parque, otro con las características técnicas de la repotenciación y el último sobre los planes de restauración de la zona.

El primer apartado describe las condiciones actuales del parque, debiendo incluir, como mínimo, la normativa aplicable al proyecto, una

descripción del parque eólico, haciendo hincapié en el número de aerogeneradores a sustituir, incluyendo marca y modelo, la potencia total del parque, el tipo de accesos con los que cuenta el parque eólico y la presencia de subestaciones.

El segundo apartado consistirá en la descripción de las obras de desmantelamiento que se van a efectuar, siendo necesario describir si se trata de repotenciación parcial o total, el número o partes de los aerogeneradores que se van a sustituir, indicando marca, modelo y potencia, una descripción detallada del procedimiento a realizar para la desinstalación completa del aerogenerador, incluyendo el desmontaje de todas las partes, los cimientos, las torres meteorológicas, los vales y plataformas de montaje, etc.

Por último, un tercer apartado incluirá los planes de restauración y revegetación de la zona, así como los plazos y el presupuesto.

2. En un segundo documento se describirán todas las acciones necesarias para la gestión de los residuos derivados de este proyecto, incidiendo en la identificación de los mismos, el lugar de tratamiento y el gestor autorizado. También será necesario un estudio de seguridad y salud que garantice unas condiciones óptimas tanto para los trabajadores como para el medio ambiente.

3. Una vez que se ha presentado toda la documentación, será necesaria la validación previa de la misma para asegurar que el procedimiento es efectuado con totales garantías. Una vez que se acepte todo el procedimiento se procederá al desmontaje e instalación del aerogenerador o de las partes necesarias para llevar a cabo la repotenciación.

Algunas empresas ya están desarrollando este tipo de repotenciones, como es el caso de Siemens Gamesa. Esta empresa lleva a cabo la repotenciación parcial a través de un proyecto denominado *Energy Thrust*, el cual consiste en la actualización de aerogeneradores antiguos con las tecnologías más avanzadas para que las turbinas mejoren su rendimiento y así se produzca un aumento de la potencia anual de, aproximadamente, el 5 %⁷⁵.

⁷⁵ Siemens Gamesa (2022). *Proyecto Energy Thrust*. Disponible en: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/service-wind/energy-thrust?msclkid=02644c2db97311ec95ea3ac9bed539f5>

Otras empresas, como Surus Inversa, S.L., han desarrollado una metodología de trabajo específica para la repotenciación total basada en la reutilización de los activos. Para ello han diseñado un plan de trabajo completo en el que se establecen todos los pasos que es necesario realizar desde que se contratan sus servicios, pasando por el desmontaje de los aerogeneradores, y finalmente la implantación de los nuevos aerogeneradores similar al descrito anteriormente.

5.2.3 Mercado secundario para activos reutilizados

En los casos en los que la repotenciación o el desmantelamiento de los aerogeneradores se realiza antes de que éstos lleguen al final de su vida útil, existe la posibilidad de utilizarlos nuevamente en otras localizaciones puesto que, en principio, se encuentran en buenas condiciones para continuar en funcionamiento. Esta opción ha sido contemplada por varias empresas del sector, las cuales han visto un nicho de mercado en esta actividad, motivo por el cual se han desarrollado los denominados mercados secundarios para activos reutilizados.

Este modelo de negocio se basa en el acercamiento entre propietarios de parques eólicos que van a repotenciar o desmantelar algunos aerogeneradores y los propietarios de los parques eólicos que quieren llevar a cabo una implantación y no pueden hacer frente a una inversión inicial tan elevada como la que se requiere para la compra de modelos nuevos, o para aquellos que necesitan determinadas piezas para sus aerogeneradores.

El primer paso para la venta de estos activos consiste en la identificación del estado en el que se encuentran, así como conocer la vida remanente de los mismos, por lo que es aconsejable realizar una evaluación técnica y un estudio de viabilidad que tenga en cuenta diversos factores, como el tiempo que ha estado en servicio o el modo de uso. Tal y como se ha indicado en el apartado 5.1.1, las palas, el rotor y la góndola son los componentes que sufren un mayor desgaste y por tanto, son las partes más susceptibles de sufrir modificaciones, por lo que son los componentes que más se

encuentran a la venta. No obstante, algunos propietarios optan por la venta de otro tipo de componentes o por vender el aerogenerador al completo.

Esta evaluación depende de la parte que se quiera poner a la venta. Por ejemplo, en el caso de las palas las revisiones más habituales consisten en inspecciones visuales y ultrasónicas que permiten medir la frecuencia natural de las palas⁷⁶ y efectuar las respectivas reparaciones necesarias. En el caso del rotor, las principales revisiones se realizan a los componentes eléctricos y electrónicos, así como todos los pequeños componentes que sufren un mayor desgaste (tornillería, pernos, etc.).

La empresa responsable de realizar la evaluación puede ser la propia empresa propietaria de los aerogeneradores o empresas certificadoras externas. A modo de ejemplo, en la actualidad existen tres empresas que han desarrollado unos estándares de calidad para la certificación de la extensión de vida de los aerogeneradores. Éstas son:

1. La consultora internacional UL cuenta con una amplia oferta de servicios para todas las empresas dedicadas a la eólica, dentro de los cuales destaca la certificación ANSI UL 4143-2018 dedicada a certificar la extensión de vida útil de los generadores eólicos *on-shore*⁷⁷.
2. La empresa DNV-GL ha desarrollado dos estándares para la extensión de vida de los aerogeneradores. El primero se denomina DNV-GL-ST-0262⁷⁸ y está enfocado en la extensión de vida del aerogenerador en su conjunto, mientras que el segundo estándar, DNVGL-ST-0263⁷⁹ se centra principalmente en aumentar la vida útil de las turbinas, lo que permite que puedan seguir operando en condiciones de seguridad⁸⁰.
3. La consultora SGS fue pionera a la hora de certificar la extensión de vida de los parques eólicos, al ser la primera en expedir una certificación de alcance completo de extensión de vida en España. La certificación en concreto es la denominada SGS ECPE-2056, con la cual realizan el análisis de fatiga y el cálculo de vida remanente de cada

⁷⁶ Respuesta vibratoria de las palas frente a ultrasonidos que permite evaluar la respuesta del material y así determinar su estado.

⁷⁷ UL (2022) *Wind Turbine Power Performance Testing*. Disponible en: <https://www.ul.com/services/wind-turbine-power-performance-testing>

⁷⁸ DNV. DNV-ST-0262 Lifetime extension of wind turbines Disponible en: <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-st-0262-lifetime-extension-of-wind-turbines.html>

⁷⁹ DNV. Certification of lifetime extension of wind turbine. Disponible en: <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-se-0263-certification-of-lifetime-extension-of-wind-turbines.html>

⁸⁰ DNV. Inspecciones de aerogeneradores. Disponible en: <https://www.dnv.es/services/inspecciones-de-aerogeneradores-3845>

componente crítico del aerogenerador, lo que permite determinar los componentes que limitan la vida útil del aerogenerador⁸¹.

4. La empresa TÜV SÜD también ha desarrollado una certificación para verificar y evaluar la seguridad fundamental con respecto a la vida útil de diseño del modelo del aerogenerador, lo que permite analizar cada una de las partes del aerogenerador y comprobar que su estado es favorable para poder extender su vida útil o para su reemplazo en otros parques eólicos⁸².

Una vez que se ha llevado a cabo el estudio de viabilidad de las piezas y se ha certificado que se encuentran en las condiciones óptimas, se puede proceder a la venta de los compuestos en mercados secundarios nacionales o internacionales por diversas empresas especializadas. El procedimiento para la venta de dichos componentes es similar para todas las empresas que trabajan en el sector. Una vez que éstos han sido retirados del parque, la empresa propietaria del aerogenerador o la empresa contratada para el desmantelamiento buscan compradores para las piezas o publican directamente la oferta en páginas web especializadas. El procedimiento de venta online puede desarrollarse de dos formas distintas: a través de una subasta, en la que se establece un precio mínimo y los posibles compradores pujan por el componente durante un tiempo determinado; o a través de la venta tradicional, en la que se estipula un precio fijo y los compradores interesados contactan con la empresa en cuestión. Actualmente existen varias empresas internacionales con este nicho de mercado:

- **Escrapalia**⁸³. Esta empresa está dedicada a la venta de todo tipo de enseres, no exclusivamente partes de aerogeneradores, mediante subasta. Para ello se añaden a su página web todas aquellas partes del aerogenerador que se quieran vender, se establece un precio mínimo y los compradores interesados son los encargados de pujar por ellos. Esta empresa es el medio que emplea Surus Inversa, S.L. para la venta de los componentes de los aerogeneradores de los parques eólicos que desinstala.

- **Spares in motion**⁸⁴. Se trata de una plataforma online de carácter internacional dedicada a la post-venta exclusivamente de componentes de aerogeneradores a precio fijo. Esta plataforma se encarga de poner en contacto a compradores y vendedores del sector, abaratando costes y ofreciendo alternativas para evitar la generación innecesaria de residuos. La empresa posee sedes en Alemania, Holanda, Estados Unidos y España.
- **Repowering solutions**⁸⁵. Empresa de carácter internacional dedicada a la reutilización de activos de la industria eólica y a la correcta gestión de los residuos derivados del desmantelamiento y la desinstalación de parques eólicos. Su principal actividad es la utilización de la economía circular en los parques eólicos para aprovechar los componentes en buen estado o que necesiten una mínima reparación, principalmente palas o bujes, para su venta a otras plantas interesadas.
- **Wind-turbine**⁸⁶. Marketplace especializado en la compra-venta de activos y piezas de repuesto de aerogeneradores nuevas o de segunda mano. Su actividad es de carácter internacional, por lo que se pueden adquirir componentes de todas partes del mundo a través de su página web.

Estos son solo algunos ejemplos de empresas dedicadas a la venta de componentes, pero en algunas ocasiones son los propios fabricantes de equipos originales los que se encargan del desmantelamiento y venta de activos de segunda mano, sin necesidad de intermediarios.

5.2.4 Comparativa entre extensión de vida útil y repotenciación

A la hora de ampliar la vida útil del parque eólico es necesario valorar la opción más favorable entre la extensión de vida útil o la repotenciación en función del estado de los aerogeneradores y de la situación de la empresa propietaria del parque.

En el caso de la extensión de vida, se trata de alargar la vida útil del parque eólico entre 5 y 10 años mediante el cambio de algunas piezas o a través de la introducción de mejoras que permitan alcanzar valores similares a los de un parque nuevo, pero con una inversión notablemente menor. Este procedimiento será rentable siempre y cuando las modificaciones no superen el 15 % del valor de un nuevo aerogenerador⁸⁷.

Otra opción sería la repotenciación total o parcial, puesto que se sustituyen y modernizan los emplazamientos más antiguos y con mejores capacidades de producción eólica, lo que permite una mayor producción eólica con un número inferior de aerogeneradores, aunque las inversiones sean más elevadas (entre un 80 -85 % del valor de un nuevo aerogenerador)⁸⁷.

En la siguiente tabla se muestra una comparativa de ambas técnicas (tabla 5):

Extensión vida útil	Repotenciación
Inversión menor, puesto que solo es necesario sustituir ciertas piezas de los aerogeneradores.	Inversión mayor al sustituirse el aerogenerador completo o partes que poseen un valor elevado.
Producción eléctrica similar a la inicial, mínimos cambios puesto que solo se sustituyen los componentes que se encuentran dañados, no se introducen grandes mejoras que afecten a la producción. La eficiencia energética se mantiene.	La modernización de los equipos permite aumentar la potencia de los aerogeneradores, lo que conlleva una mayor producción eléctrica. La eficiencia energética es superior cuanto mayor sea el número de partes sustituidas.
Viabilidad a corto plazo, menos sensible a los cambios regulatorios.	Mayor afectación a los cambios regulatorios al amortizarse la inversión en varios años.
Técnica no recomendable para parques que no disponen de repuestos y cuya tecnología se encuentra obsoleta.	Única opción viable para los parques con obsolescencia tecnológica o que no disponen de repuestos.
La potencia del parque no se incrementa, por lo que es necesario mantener unas horas mínimas de funcionamiento.	Posibilidad de incrementar la potencia del parque siempre y cuando exista suficiente capacidad de acceso y conexión en la red, dentro de los límites establecidos por la legislación.
Mantenimiento de la carga de trabajo de la industria, puesto que solo es necesario fabricar repuestos o las mismas piezas.	Incremento de la carga de trabajo sobre la industria, ya que es necesario fabricar nuevas piezas y mejorar la tecnología existente.
Introducción de nuevas técnicas para la detección de fallos y el mantenimiento de los aerogeneradores, implementando el uso de la digitalización y el big data.	La instalación de equipos más modernos permite mejorar las técnicas de mantenimiento y detección de fallos, debido a que los nuevos aerogeneradores disponen de tecnologías capaces de detectarlo.
Posibilidad de reutilización de componentes provenientes de otros parques eólicos.	Los componentes son principalmente nuevos en el caso de la repotenciación total, mientras que en la repotenciación parcial se pueden emplear algunas partes del aerogenerador antiguo, como es la torre y la cimentación.
No se obtiene beneficio por los componentes retirados.	Los componentes retirados pueden venderse en mercados secundarios, lo que permite recuperar parte de la inversión realizada.
Los requerimientos administrativos necesarios son muy bajos o nulos, ya que no es necesario solicitar ningún tipo de permiso para esta operación.	Los requerimientos administrativos pueden aumentar hasta el punto de necesitar una nueva autorización en el caso de que la repotenciación conlleve el aumento considerable de la potencia.
El impacto de la operación en la planta es mínimo o prácticamente nulo.	El impacto sobre la planta puede ser medio o alto, dependiendo de cada caso específico.

Tabla 5. Comparativa entre extensión de vida útil y repotenciación de los parques eólicos.
Fuente: Energías Renovables⁸⁷ y AEE⁶⁰.

5.2.5 Ventajas e inconvenientes

La repotenciación de parques eólicos conlleva una serie de ventajas para el sistema eléctrico, entre las que se incluye el incremento de generación renovable a

igualdad de potencia instalada. Esto se debe a que los parques repotenciados, al encontrarse en los mejores emplazamientos, permiten duplicar, aproximadamente, la energía generada. Esto permite proporcionar una mayor seguridad y flexibilidad para el sistema eléctrico,

⁸¹ SGS (2018) Artículo. *SGS pionera en certificación de extensión de vida de parques eólicos: primera certificación de alcance completo en España*. Disponible en: <https://www.sgs.es/es-es/news/2018/10/certificacion-parques-eolicos>

⁸² TÜV SÜD. *Extensión de la vida útil de los parques eólicos*. Disponible en: <https://www.tuvsud.com/es-es/industrias/energia/energia-eolica/evaluacion-extension-vida-util-aerogeneradores-parques-eolicos>

⁸³ <https://www.escrapalia.com/es/>

⁸⁴ <https://www.sparesinmotion.com/>

⁸⁵ <http://www.repoweringsolutions.com/>

⁸⁶ <https://es.wind-turbine.com/?msclkid=aaac2dc4b97511ecbad37620a189f8b7>

⁸⁷ Energías renovables (2018). Artículo. *Repotenciación o extensión de vida, estrategias clave para el sector eólico español*. Disponible en: <https://www.ener-gias-renovables.com/eolica/repotenciacion-o-extension-de-vida-estrategias-clave-20181126/>

puesto que se sustituyen aerogeneradores antiguos, que en algunos casos ni siquiera cumplen con los requerimientos de huecos de tensión, por otros nuevos adaptados a los nuevos códigos de red recientemente aprobados⁸⁸.

Siguiendo la misma línea, la repotenciación genera una mejor integración de las renovables en la operación técnico/económica del sistema gracias a la capacidad para participar en los servicios de ajuste y nuevos servicios de balance, como la regulación de potencia (PO 7.X)^{89,90} o el control de tensión (PO 7.4)⁹¹. Otra ventaja sería el aumento de la capacidad de acceso en las redes de transporte y distribución. Según la Circular 1/2021, de 20 de enero, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se establece la metodología y condiciones del acceso y de la conexión a las redes de transporte y distribución de las instalaciones de producción de energía eléctrica⁹², recientemente publicada por la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), se establecen diferentes umbrales para el criterio de potencia de cortocircuito (parámetro WSCR), dependiendo de si en el nudo existe o no generación antigua conectada. La repotenciación permitirá reducir el umbral de WSCR de 10 a 6, al sustituir los modelos de aerogenerador antiguos que presentan limitaciones para operar en condiciones de potencias de cortocircuito bajas.

Por otro lado, la repotenciación supone una ventaja para las zonas rurales, puesto que el mantenimiento de la capacidad industrial eólica impulsa la fabricación de nuevos aerogeneradores, lo que genera empleo y actividad económica en dichas zonas, a la vez que se mejora la huella medioambiental y el impacto visual de los parques eólicos, ya que se reducen el número al reducir significativamente el número de aerogeneradores instalados.

En cuanto a los inconvenientes, la falta de un tratamiento específico en la regulación nacional para la repotenciación de los parques eólicos supone que, por el momento, la mayor parte de las técnicas que se emplean estén enfocadas en la extensión de la vida útil en lugar de la repotenciación. Otro punto a tener

en cuenta es el elevado coste que supone la repotenciación frente a la extensión de la vida, por lo que la repotenciación queda relegada a los propietarios solventes de parques eólicos que posean aerogeneradores obsoletos o que no dispongan de recambios, donde el mantenimiento no es posible y la única solución es el desmantelamiento.

No obstante, la administración pública está intentando revertir esta situación a través de la legislación y de una serie de programas a nivel nacional que impulsen este tipo de actividades. Es el caso del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030⁹³, donde se confiere una mayor relevancia a la renovación de la mayor parte de las instalaciones eólicas en la medida 1.9. “Plan de renovación tecnológica en proyectos ya existentes de generación eléctrica con energías renovables”. También dentro del PNIEC se incluye la posibilidad de organizar subastas específicas para la renovación tecnológica de las instalaciones renovables que hayan superado su vida útil, otorgando una retribución adicional a todas las instalaciones que lleven a cabo tareas de repotenciación.

5.3 Desmantelamiento de los aerogeneradores

5.3.1 Operaciones de desmantelamiento

Este proceso es el mismo que se realiza a la hora de la repotenciación de aerogeneradores de parques eólicos, ya que en ambos casos es necesario llevar a cabo una desinstalación de los mismos, pero se diferencia en el trato y cuidado en el manejo de las piezas retiradas. En el caso de la repotenciación cuyas piezas sean destinadas a la venta en mercados secundarios, es necesario atender a cada paso realizado, ya que las piezas serán vendidas a otras empresas para su utilización y deben encontrarse en perfectas condiciones, por lo que no pueden sufrir daños durante su manipulación. En el caso del desmantelamiento, se trata de compuestos

desechados que van a ser reciclados y que no se van a emplear nuevamente para el mismo fin para que el que fueron concebidos, por lo que no es necesario preocuparse por si éstos sufren deterioro.

Antes de proceder a la retirada de los aerogeneradores, es necesario realizar una planificación de las tareas que se van a llevar a cabo, detallándose plazos y operaciones para evitar posibles imprevistos o retrasos. También es necesario realizar una estimación del peso, dimensiones y otros parámetros de los elementos que se desinstalarán del parque, así como el número total de aerogeneradores que se van a retirar, si procede. Es necesario conocer previamente estos parámetros, así como las características específicas de cada parque eólico, para realizar una previsión de la maquinaria necesaria.

He Inversa, S.L., propone el siguiente procedimiento para el desmantelamiento de los parques eólicos⁹⁴:

1. Desconexión de la energía de los aerogeneradores y centros de transformación. La empresa propietaria del parque eólico debe asegurarse que todos los aerogeneradores no se encuentren conectados a la red eléctrica antes de comenzar con la desinstalación. En el caso de que fuera necesario, se llevarían a cabo trabajos de desbroce en las zonas contiguas a las máquinas para trabajar más cómodamente.

2. Una vez que se ha adecuado la zona de trabajo, se procede al desmontaje del rotor y las palas. Este procedimiento puede realizarse de dos formas, en función del tipo de máquina que se vaya a gestionar (figura 13):

- a. En el caso de que, por las características del aerogenerador, se quiera desmontar el rotor completo (rotor más palas) es necesario despejar una superficie mayor alrededor del aerogenerador para poder bajarlo. Para ello, es necesario desatornillar los tornillos que unen el rotor a la góndola hasta que ésta se encuentre liberada y bajarla al suelo posicionándose horizontalmente. La bajada y posterior apoyo en el suelo del rotor completo se realiza con la ayuda de un camión-pluma, el cual engancha su eslinga a la punta de la tercera pala que está en posición vertical hacia abajo para poder maniobrar conjuntamente con la grúa



⁸⁸ <https://www.boe.es/buscar/pdf/2020/BOE-A-2020-8965-consolidado.pdf>

⁸⁹ https://www.ree.es/sites/default/files/01_ACTIVIDADES/Documentos/ProcedimientosOperacion/PO_resol_30jul1998_b.pdf

⁹⁰ https://www.ree.es/sites/default/files/01_ACTIVIDADES/Documentos/ProcedimientosOperacion/BOE-A-2022-4969.pdf

⁹¹ https://www.ree.es/sites/default/files/01_ACTIVIDADES/Documentos/ProcedimientosOperacion/PO_resol_10mar2000_correc.pdf

⁹² <https://www.boe.es/buscar/pdf/2021/BOE-A-2021-904-consolidado.pdf>

⁹³ https://www.miteco.gob.es/images/es/pnieccompleto_tcm30-508410.pdf

⁹⁴ Surus Inversa, S.L. (2021). *Repotenciación circular parques eólicos*. Disponible en: <https://www.surusin.com/repotenciaciones-circulares/>

autoportante y el camión-pluma y así apoyar en tacos de poliestireno el rotor completo.

- b. Cuando las grúas no pueden desmontar el total del rotor por diversos motivos (las dimensiones, el peso de las palas, la zona o el

modelo de aerogenerador hace que no sea posible desmontar toda la pieza en su conjunto) se llevará a cabo el desmontaje de las palas de forma individual utilizando una grúa autoportante.



Figura 13. Desmontaje del rotor completo (izq.) y desmontaje por palas (der.).
Fuente: Surus Inversa, S.L.⁹⁴.

3. Una vez que se han desmontado y depositado las palas en el suelo se efectúa su retirada. Este proceso puede variar en función del destino de las mismas: si es la reutilización, se cargarán las palas en camiones plataforma que las transportarán hasta las zonas de acopio dentro del propio parque o en el lugar en el que se determine; mientras que, si las palas no han sido asignadas a ninguna empresa o parque eólico, se realizará el traslado y tratamiento oportuno de las mismas. En este caso, para facilitar su transporte, se cortarán en piezas más pequeñas *in situ*.
4. En el momento que se desinstala el rotor se continúa el proceso desmontando y bajando la góndola completa. Para ello se eslinga en sus cuatro enganches superiores, se desatornilla de su unión con el fuste y se baja al suelo. Este proceso

- también debe realizarse con cuidado para los casos en los que esta parte va a ser reutilizada en otras instalaciones.
5. Una vez que la góndola está abajo se procede a desmontar el fuste en los distintos tramos que lo componen, desatornillándolos y bajándolos individualmente con ayuda de las grúas. Para facilitar su transporte los tramos del fuste están diseñados para introducirse unos dentro de otros mediante unos herrajes diseñados específicamente para esa maniobra, lo que permite ahorrar costes al reducirse significativamente la cantidad de material a transportar.
6. Cuando se han desmontado todas las partes de los aerogeneradores, se trasladan a una zona del parque reservada para tal fin para su posterior

transporte a las plantas de tratamientos de residuos (figura 14). En el caso de que los aerogeneradores vayan a ser comprados y utilizados en otras instalaciones, es necesario marcar todas

las piezas con el número de la máquina a la que pertenecen, lo que facilita la identificación y la retirada de los mismos por parte de los compradores.



Figura 14. Diferentes componentes de aerogeneradores desmontados en la zona de acopio.
Fuente: Surus Inversa, S.L.⁹⁴.

7. Otra de las partes de los parques eólicos que se retira son los centros de transformación, salvo en los casos en los que se realice una repotenciación del parque. En esos casos es necesario mantener dichos elementos, ya que son válidos para las nuevas turbinas, necesitando, únicamente, una serie de modificaciones para adaptarlos a la nueva potencia generada por cada uno de los aerogeneradores.
8. Por último, se procede a la demolición de los cimientos de hasta 1 metro de profundidad (tanto de las cimentaciones de los aerogeneradores como de las torres de medición). Para la demolición de los mismos se emplean medios mecánicos, como es martillo picador con máquina

giratoria. Durante la ejecución de toda la obra se realiza la correcta segregación de los residuos para su posterior reutilización o tratamiento adecuado. Una vez que se ha retirado la cimentación se realiza el relleno de la zona excavada y el acondicionamiento de las pistas empleando el hormigón presente en los cimientos, previa trituración, siempre que se encuentre en buenas condiciones y no esté dañado o contaminado por algún compuesto derivado del aerogenerador (figura 15). Encima de estos materiales se añade una capa de tierra vegetal autóctona de un espesor de entre 0,50 y 0,75 cm para que permita la repoblación de especies herbáceas de la zona.



Figura 15. Secuencia de restauración del hueco de los cimientos de un aerogenerador.

Fuente: Surus Inversa, S.L.⁹⁴.

Una vez que se han desinstalado todos los componentes del aerogenerador es necesario restaurar el terreno en el que se encontraba el parque eólico para asemejarlo lo máximo posible a las condiciones previas a la instalación. Esta restauración debe realizarse manteniendo las condiciones de la zona colindante, por lo que la vegetación incluida debe corresponderse con la de las proximidades, no siendo posible en ningún caso la introducción de especies externas que puedan derivar en problemas de invasión de especies.

Por último, en el momento que se ha producido la desinstalación completa del parque eólico y los componentes hayan sido retirados del emplazamiento y trasladados a otras instalaciones, la empresa propietaria del parque o la empresa encargada del desmantelamiento, por orden del propietario, podrá desmontar los componentes extraídos tanto de los aerogeneradores como de los centros de transformación, los cuales se dividen en grandes (trenes de potencia, palas, rotores, etc.) y pequeños (generalmente se trata de piezas eléctricas, como arrancadores, frenos, transductores de presión, entre otros). Estos componentes pueden emplearse como piezas de repuesto para los aerogeneradores que necesiten disponer de alguna de estas piezas para continuar en funcionamiento (siendo una técnica de extensión de vida útil) o pueden no ser útiles, ya que tras la retirada de determinadas piezas puede ser inservible, por lo que tendrán que ser gestionadas correctamente como residuos por gestores autorizados. En este segundo caso, será necesario realizar una separación de los elementos por componentes o de la forma que se determine, para garantizar su correcta gestión.

5.3.2 Ventajas e inconvenientes

Una de las ventajas que supone el correcto desmantelamiento de los parques eólicos es el reciclaje de hasta un 84 % de los componentes de los aerogeneradores gracias a la correcta separación de los residuos, lo que va a permitir un tratamiento más adecuado por parte de los gestores de residuos, sin necesidad de invertir esfuerzos en la separación en planta de tratamiento. Esto va a suponer un mayor aprovechamiento de los recursos, ya que podrán aplicarse como materias secundarias, lo que generará una menor dependencia de los recursos naturales. Por otro lado, el sector del reciclaje de las palas de los aerogeneradores se encuentra en constante actualización, lo que permite desarrollar técnicas más eficientes que permitan la correcta gestión de los residuos para evitar su depósito en vertedero, o el desarrollo de aerogeneradores fabricados con materiales más reciclables, lo que simplificará su tratamiento posterior y evitará la generación de residuos innecesarios.

En contraposición, uno de los inconvenientes del desmantelamiento es el propio tamaño de los residuos a gestionar, ya que es necesario movilizar gran cantidad de medios para la retirada de los aerogeneradores del parque y maquinaria de gran envergadura para su traslado a los puntos de tratamiento, lo que aumenta los costes. Además, actualmente no existen tecnologías lo suficientemente implantadas en el mercado capaces de gestionar todos los residuos que se producirán en los próximos años, cuando un elevado número de aerogeneradores llegue al final de su vida útil. ■

6 BUENAS PRÁCTICAS Y PREVISIONES DE FUTURO PARA EL RECICLAJE DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES DE UN AEROGENERADOR

Un factor clave en la gestión posterior de cualquier tipo de residuo son los materiales constituyentes del producto inicial y sus propiedades. En el caso de los aerogeneradores hay muchos elementos que cuentan con sistemas de gestión y tratamientos bien establecidos para determinados flujos de residuos, como es el caso de los metales (acero, cobre, aluminio, hierro, etc.), el hormigón de las torres u otros componentes internos (cables, AEE, plásticos, etc.). Pero, por otro lado, existen ciertos componentes que representan un gran desafío para el reciclaje puesto que sus tecnologías de tratamiento todavía están en fase de investigación o en desarrollo a escala industrial. Entre los componentes más problemáticos se encuentran, sobre todo, las palas de las turbinas, que se fabrican con fibra de vidrio o fibra de carbono combinada con resinas plásticas y materiales compuestos, y los generadores, que contienen tierras raras y materias primas críticas⁹⁵.

Estas materias primas críticas podrían ser lo suficientemente valiosas como para que se desarrolle un canal de reciclaje específico y económicamente viable para, por ejemplo, los imanes permanentes, dado que todavía no existe un mercado claramente definido para ello. Y

en cuanto al material compuesto de las palas, los fabricantes ven pocas posibilidades de reemplazar en las fases de diseño este tipo de materiales, dado que son los más livianos que existen, por lo que la apuesta debe seguir centrándose en la mejora de los tratamientos de reciclaje y recuperación de los componentes del material compuesto.

Otro problema específico al que se enfrenta el reciclaje de las palas eólicas es su gran tamaño, que va desde los 20 m en las más antiguas hasta los 150-200 m para las futuras turbinas. Esto representa un desafío a lo largo de toda la cadena logística del reciclaje, desde las fases de desmantelamiento y el transporte, hasta la infraestructura de las propias plantas de tratamiento⁹⁵.

Aunque hoy en día se están estudiando soluciones alternativas muy innovadoras a los tradicionales molinos

eólicos, como los aerogeneradores sin aspas que aprovechan la energía derivada de la oscilación, la resonancia aeroelástica y el fenómeno físico de formación de vórtices, que todavía se encuentran en fases de desarrollo. En lugar de torre, góndola y aspas, este tipo de dispositivos solo constan de un mástil ligero y mucho más pequeño de material compuesto, reduciendo en gran medida el consumo de materiales, la cimentación y los mencionados problemas de transporte, ventajas que, en cierta medida, pueden hacerse extensibles a un reciclaje más sencillo⁹⁶.

A lo largo de este apartado se abordarán las previsiones de futuro para el reciclaje de los diferentes materiales que constituyen los aerogeneradores en función de las principales tecnologías de reciclaje existentes en la actualidad y de algunos de los proyectos de investigación, desarrollo o implementación más importantes del panorama europeo reciente. En estos casos, junto al nombre del proyecto se especifica la dirección web de su página oficial (si tienen una específica).

El apartado se ha dividido en dos grandes grupos en función de los flujos de residuos materiales que se producen en el desmantelamiento de un aerogenerador: el primero, referido exclusivamente a los materiales compuestos por su importancia y problemática

asociada (apartado 6.1); y el segundo, en relación al resto de materiales más o menos significativos del aerogenerador (acero, hormigón, madera de balsa, aceites, RAEE, tierras raras y adhesivos) (apartado 6.2).

6.1 Material compuesto

Los materiales compuestos son el resultado de la unión de varios materiales diferentes con la finalidad de constituir uno nuevo con mejores propiedades que la de sus componentes por separado. Normalmente, presentan una estructura de fases, en la que un material estructurante o de refuerzo (fase dispersa) se encuentra embebido en un material de soporte continuo (fase matricial), normalmente resinas, otorgando al conjunto una mayor resistencia y rigidez¹⁰.

Los materiales compuestos tienen un papel relevante en el sector eólico puesto que constituyen casi el 70 % del peso total de las palas de los aerogeneradores⁹⁷, siendo los materiales compuestos reforzados con fibras y los estructurales los constituyentes más habituales de las vigas y las conchas (*shell*) de las palas (figura 16).

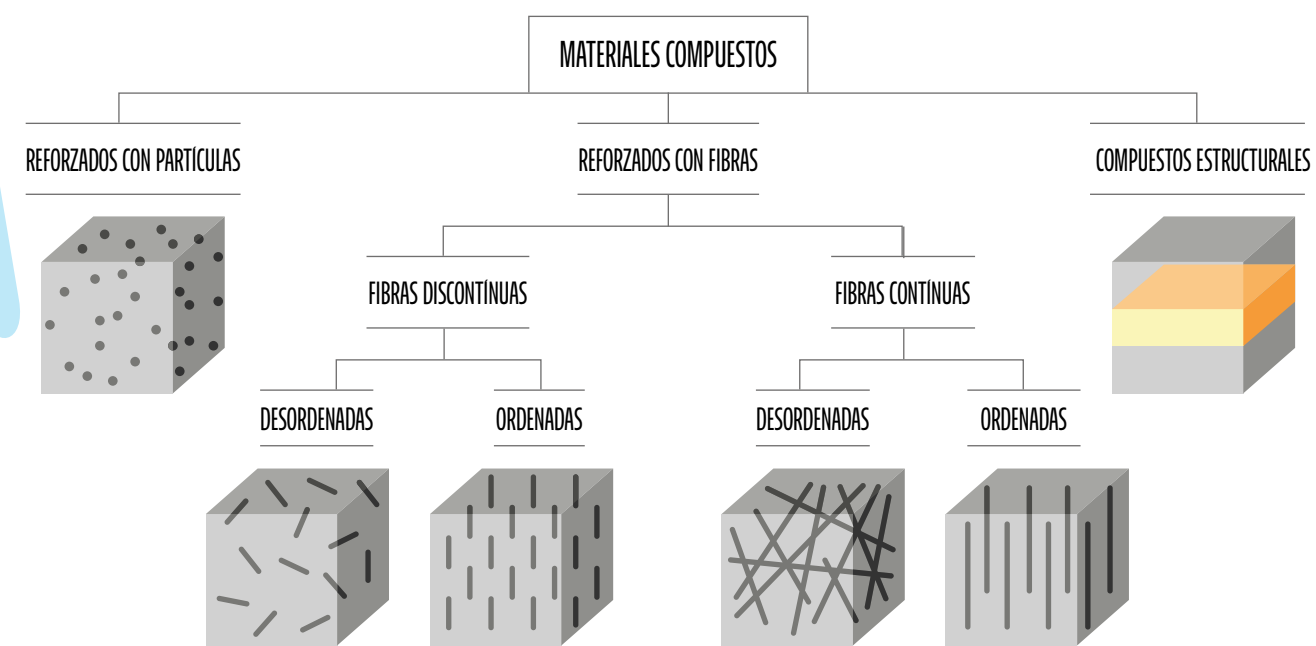


Figura 16. Clasificación de los materiales compuestos.
Fuente: elaboración propia.

⁹⁵ Oeko-Institut e.V., IDEA Consult & IEEP (2021) *Emerging waste streams – Challenges and opportunities*. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-waste-streams-opportunities-and>

⁹⁶ VORTEX Bladeless. *¿Cómo funciona Vortex? El primer aerogenerador sin palas ni engranajes*. Disponible en: <https://vortexbladeless.com/es/ desarrollo-tecnologia/>

⁹⁷ Fox, T. R. (2016) *Recycling wind turbine blade composite material as aggregate in concrete*. Ames, Iowa: Iowa State University. Disponible en: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/c915b8f9-0881-46b2-ac67-ef36b40e821>

En el material compuesto reforzado con fibras de las palas de las turbinas, la fase dispersa constituye alrededor del 75 % en peso del material compuesto y generalmente es un Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (GFRP) debido a su alta disponibilidad en el mercado. La fibra de vidrio tiene como principal ventaja su bajo coste, alta estabilidad térmica y elevado punto de fusión, no inflamabilidad y resistencia a la corrosión. Su principal desventaja es la carencia de métodos de reciclaje económicos para recuperar el material, lo que ocasiona que, a día de hoy, las palas de los aerogeneradores no sean efectivamente recicladas¹⁰.

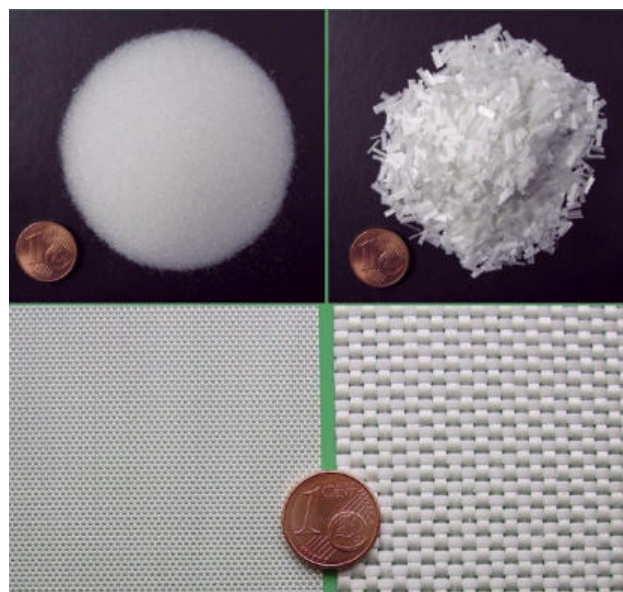


Figura 17. Microesferas y tejidos de fibra de vidrio (izq.) y fibra de carbono laminada (der.).
Fuente: Cjp24 (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Glass_with_a_polymer.jpg?uselang=es) y Duboyong (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ready_to_use_carbon_fiber_sheet.jpg)

La fase matricial está constituida normalmente por resinas orgánicas termoestables (epoxis, poliésteres y ésteres de vinilo) y termoplásticas, siendo más habituales las primeras por su adaptabilidad a diferentes

A medida que las palas han aumentado en longitud y peso, se han comenzado a incorporar Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono (CFRP), como materiales en combinación con la fibra de vidrio o incluso en sustitución de la misma. Ésta se considera como una alternativa a la fibra de vidrio al proporcionar mayor rigidez, poseer una menor densidad, y disponer de tecnologías de reciclaje más accesibles. Por el contrario, emplear CFRP tiene mayor coste, ya que es un material más sensible a la degradación y que atrae más fácilmente a los rayos por su mayor conductividad¹⁰ (figura 17).



procesos de transformación, pese a su mayor dificultad de reciclaje. Una vez curadas junto a las fibras de la fase dispersa constituyen un vínculo extremadamente fuerte (figura 18).

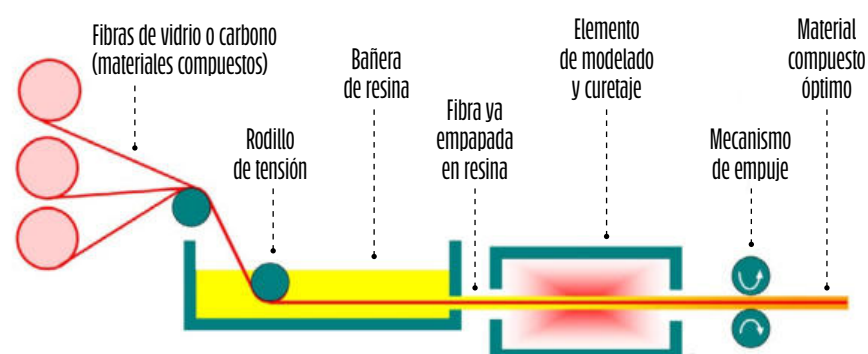


Figura 18. Esquema simplificado de fabricación de material compuesto mediante pultrusión.
Fuente: Laurens van Lieshout (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pultrusion_process_01.png?uselang=es)

A su vez, este material compuesto reforzado con fibras se encuentra formando parte del material compuesto de tipo estructural en forma de “capas” en algunos puntos de la concha y la viga de la pala, protegiendo un núcleo de madera de balsa o PVC en los llamados laminados de tipo *sándwich* (figura 19). Se

utilizan tres métodos para la fabricación de estos laminados compuestos: la laminación manual o método húmedo (reservado para operaciones de reparación), la laminación de telas pre-impregnadas en resina y la laminación por infusión de resina⁹⁸.

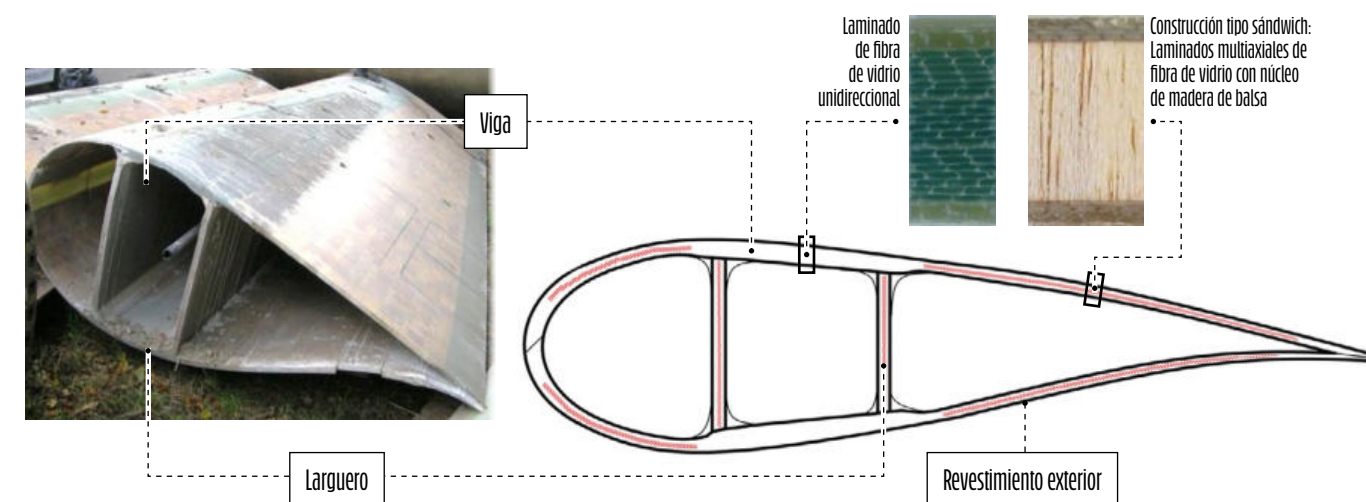
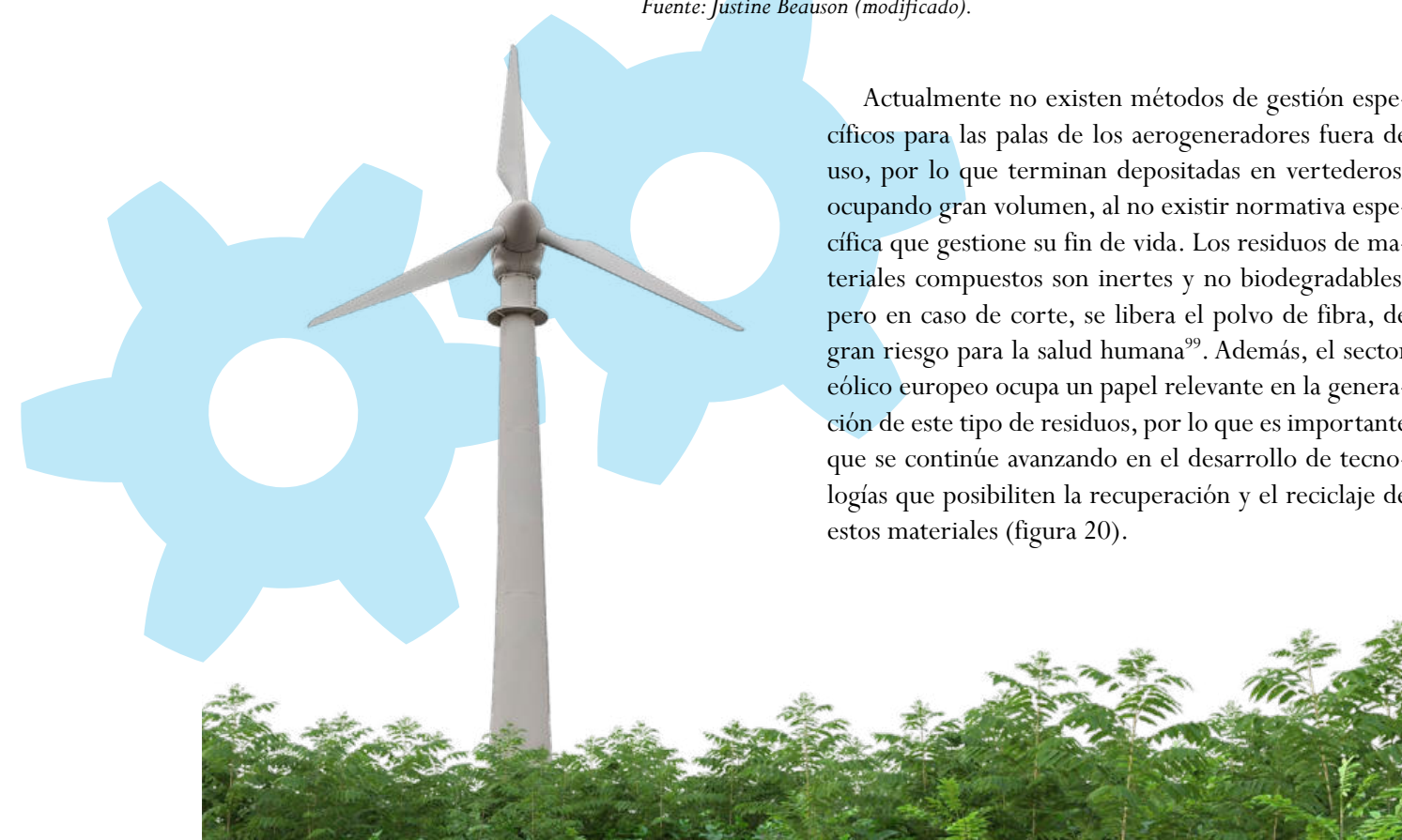


Figura 19. Distribución genérica de los materiales compuestos en la sección transversal de una pala de aerogenerador.
Fuente: Justine Beauson (modificado).



Actualmente no existen métodos de gestión específicos para las palas de los aerogeneradores fuera de uso, por lo que terminan depositadas en vertederos, ocupando gran volumen, al no existir normativa específica que gestione su fin de vida. Los residuos de materiales compuestos son inertes y no biodegradables, pero en caso de corte, se libera el polvo de fibra, de gran riesgo para la salud humana⁹⁹. Además, el sector eólico europeo ocupa un papel relevante en la generación de este tipo de residuos, por lo que es importante que se continúe avanzando en el desarrollo de tecnologías que posibiliten la recuperación y el reciclaje de estos materiales (figura 20).

⁹⁸ TotalHSE & Global Wind Organisation (2020) *Manual de reparación 1. Partes de la pala*.

⁹⁹ REFIBRE (2021) *Manual de buenas prácticas Life REFIBRE. Pavimentos asfálticos de alto valor añadido con fibra de vidrio procedente del reciclaje sostenible de las palas de aerogeneradores*. Disponible en: https://www.liferefibre.eu/wp-content/uploads/2021/02/Life-Refibre-BuenasPracticas_v2.pdf

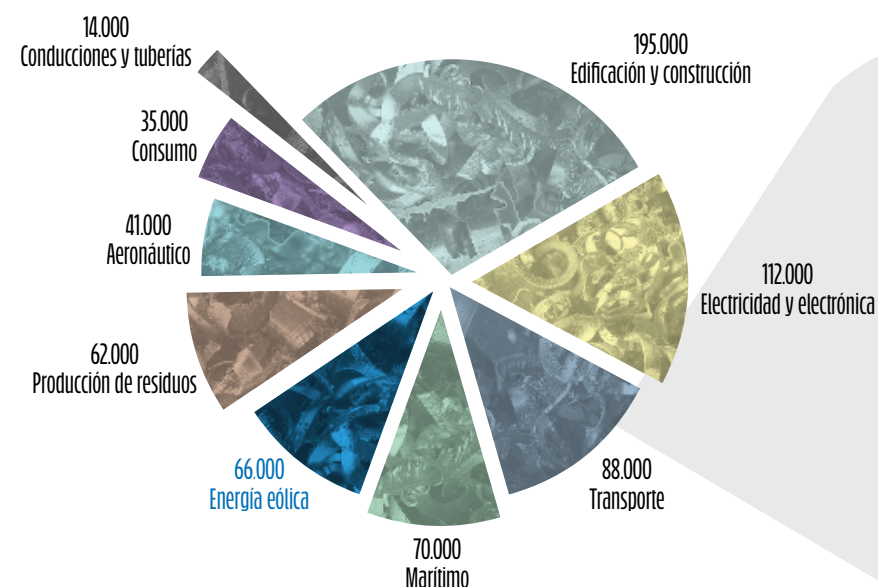


Figura 20. Generación estimada de residuos de materiales compuestos por sector en 2025 en la UE (toneladas).
Fuente: elaboración propia a partir de DecomBlades¹⁰⁰.

En la actualidad, el complejo reciclaje de estos materiales ha dado lugar a la aparición de varias tecnologías, muchas de ellas aún en fases de investigación y desarrollo, y algunas otras más maduras. Sin embargo, todas estas tecnologías se enfrentan al reto de la escalabilidad y aplicabilidad en mercado en función de su

nivel de madurez tecnológica (en adelante, TRL, por sus siglas en inglés, *Technology Readiness Level*), su viabilidad económica y la obtención de un producto reciclado equiparable en propiedades a la materia prima original, pudiendo incluso combinarse varias de ellas durante los procesos de tratamiento (figura 21).

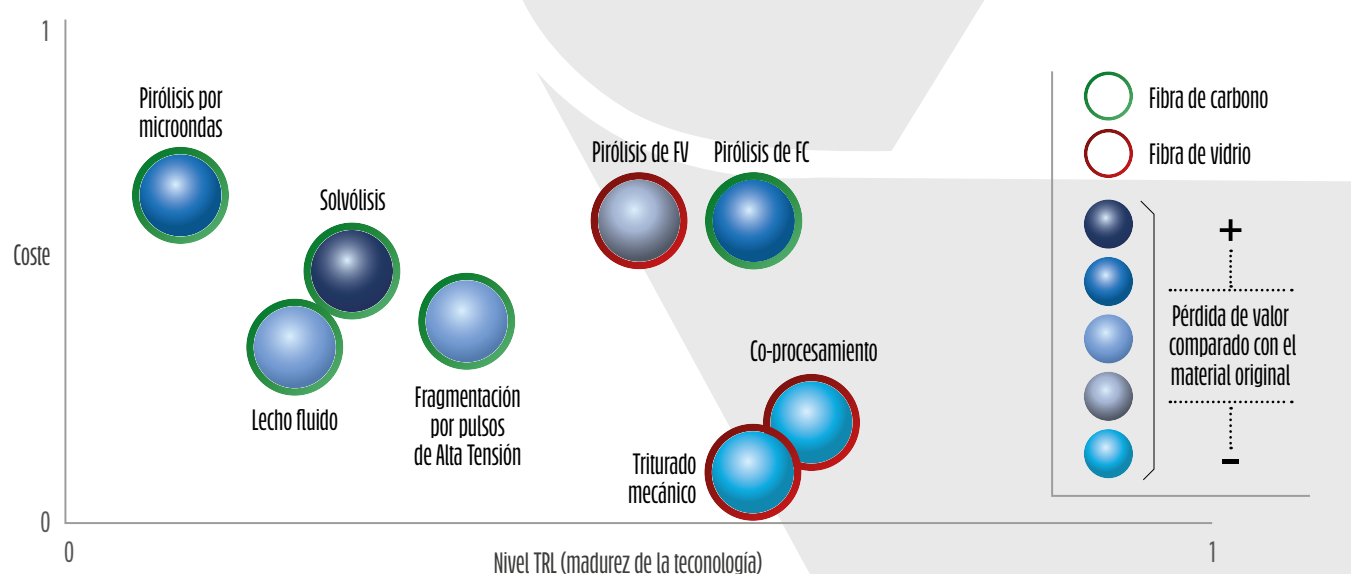


Figura 21. Comparativa de las diferentes tecnologías.
Fuente: elaboración propia a partir de AEE (2020)¹⁰.

Dada su importancia, las diferentes tipologías de reciclado del material compuesto de las palas de los aerogeneradores se tratan en detalle en los apartados siguientes.

6.1.1 Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico consiste en el reprocesamiento del material por medios físicos y a través de operaciones como el corte, la trituración, la selección, la clasificación, etc., en material de tamaño y volumen menores a los iniciales. Los pasos sucesivos para el reciclaje mecánico pueden variar de un proceso a otro, dependiendo del grado de selección deseado y del uso final.

Tecnologías empleadas

Triturado mecánico

Tecnología de preprocesamiento sencilla, eficaz y económica que consiste en el corte de las palas y posterior trituración en trozos irregulares del tamaño deseado, normalmente milímetros, retirando los metales del resto de material mediante imanes (figura 22).

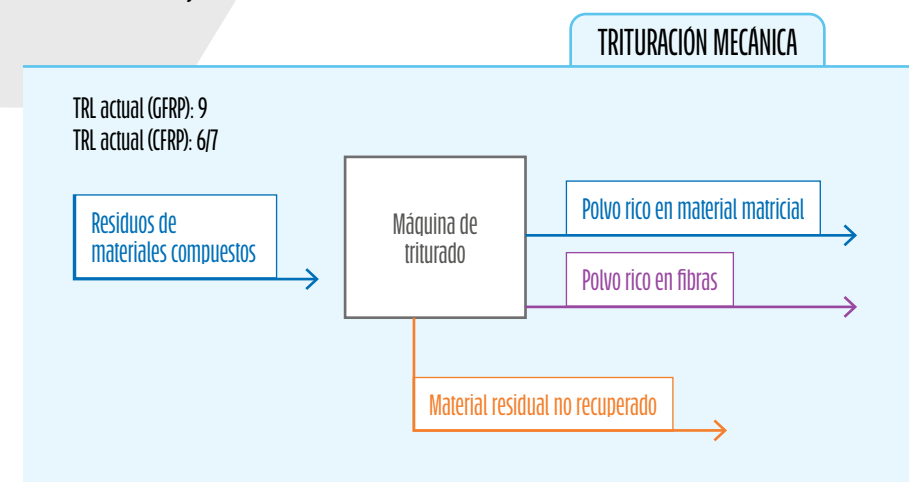


Figura 22. Esquema simplificado del tratamiento de trituración mecánica.
Fuente: elaboración propia a partir de ETIPWind (2019)⁶⁸.

El proceso comienza en el mismo parque eólico, donde las palas son cortadas en segmentos de alrededor de 10 metros para facilitar su traslado. Para minimizar las emisiones de polvo, el corte de las piezas se realiza humidificando la zona de trabajo y recogiendo el fluido final.

WindEurope¹⁰¹ propone acondicionar la zona mediante un entorno cerrado provisional que proteja del polvo y del ruido generado del procedimiento de corte, para el que plantea cuatro técnicas:

1. Cortadora por chorro de agua: Este método utiliza un chorro de agua a muy alta presión, o una mezcla de agua y una sustancia abrasiva capaz de cortar diferentes materiales de la hoja, incluidos los metales. El proceso es respetuoso con el me-

dio ambiente, en lo que respecta a las emisiones de polvo y el ruido, pero hace un uso elevado de agua.

2. Sierra de hilo: Método de corte más lento que utiliza un hilo de acero con dientes de diamante, que se enrolla alrededor de la pala del aerogenerador, pudiendo cortar suavemente y con definición diferentes materiales, como madera y metal. El proceso tiene bajas emisiones de partículas y ruido, y requiere de agua de refrigeración, que se puede reciclar posteriormente.
3. Sierras circulares: Corte mediante sierras circulares con punta de diamante de hasta 2 metros de diámetro de cualquier tamaño y casi en cualquier dirección, lo que permite extraer materiales selectivamente, como los laminados o la madera

¹⁰⁰ <https://decomblades.dk/>

¹⁰¹ WindEurope (2020) *Decommissioning of Onshore Wind Turbines. Industry Guidance Document*. Disponible en: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/decommissioning-of-onshore-wind-turbines/#overview>

de balsa. Se requieren varias pasadas por corte, generando muchas partículas, por lo que se debe combinar con diferentes sistemas de recogida de polvo, ya sea mediante vacío o mediante agua.

4. Cortadora de mandíbula: El cortador de mandíbulas hidráulico es el método más común para seccionar palas de aerogeneradores. Produce un corte grueso y aplasta el material en la zona de corte. Requiere de una vaporización continua

de agua para controlar las emisiones de polvo y fibra. Las secciones cortadas son propensas a emitir polvo y fibras también durante el transporte, lo que aumenta la necesidad de un estibado adecuado.

Una vez en las instalaciones de reciclado, los segmentos de pala son triturados mecánicamente (figura 23). Este material puede ser utilizado como relleno o refuerzo, pero carece de la resistencia y calidad inicial, por lo que se reduce su valor.



Figura 23. Material compuesto con GFRP tras trituración.
Fuente: Reciclalia.

No hay distinción entre las dos fases del material compuesto en el producto reciclado y para obtenerla es necesario llevar a cabo una separación secundaria más compleja, que tampoco obtiene productos del todo homogéneos. Pese a que es un proceso muy asentado en el mercado, no es la mejor tecnología de tratamiento de cara al futuro¹⁰.

Fragmentación por pulsos de Alta Tensión

La fragmentación del material compuesto por pulsos de Alta Tensión es un proceso electromecánico que separa con alta eficiencia las matrices de las fibras en los materiales compuestos mediante el uso de electricidad (figura 24). Como ventaja, comparado con el triturado mecánico, las fibras que se obtienen son de mayor calidad, además de tener una mayor longitud y limpieza.

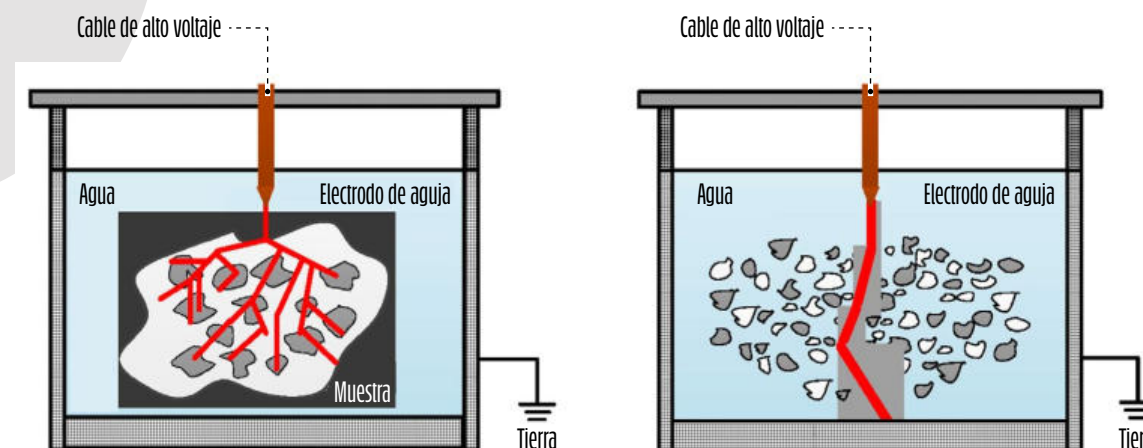


Figura 24. Diagrama esquemático que muestra la desintegración de partículas sólidas por pulsos eléctricos de alta tensión.
Fuente: Gao et al. (2017)¹⁰².

Sin embargo, hasta la fecha sólo se han podido recuperar en el proceso fibras de pequeño tamaño. Además, para conseguir fibras de alta calidad se requieren

grandes niveles de energía, por lo que todavía se la puede considerar una tecnología en fase de investigación¹¹ (figura 25).

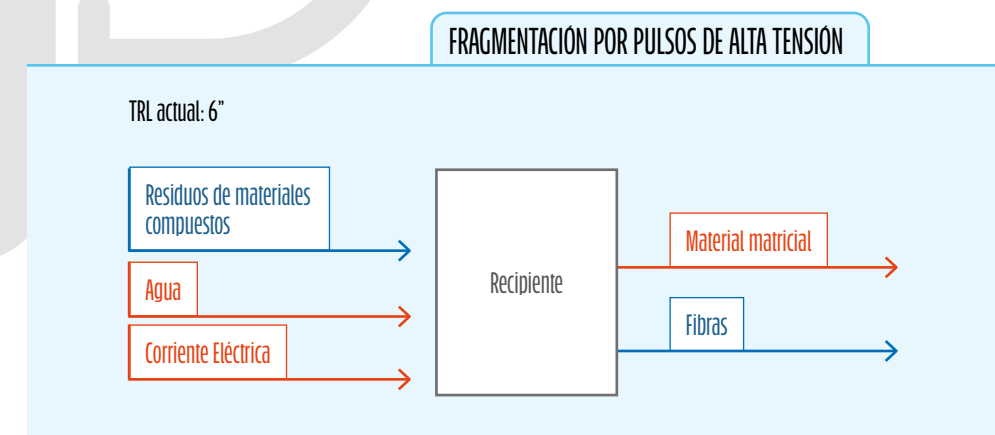


Figura 25. Esquema simplificado del tratamiento de fragmentación por pulsos de Alta Tensión.
Fuente: elaboración propia a partir de ETIPWind (2019)⁶⁸.

Coprocesamiento de cemento

Se trata de una opción de bajo coste muy asentada y operada a escala comercial que permite la recuperación de energía y la producción de clínker de cemento, pero adecuada exclusivamente para GFRP. Si bien este método de procesamiento no es estrictamente reciclaje, ya que no existe la posibilidad de utilizar el material reciclado en otra aplicación, presenta ventajas sobre la incineración con recuperación de energía de estos residuos.

Tras la recuperación mecánica de los residuos de fibra de vidrio, las partículas compuestas se mezclan con otro combustible sólido recuperado y se introducen en los hornos de cemento. El contenido orgánico (resina, materiales del núcleo, adhesivo, etc.) se quema y ayuda a impulsar el proceso con la energía calorífica liberada, mientras que las cenizas de las fibras de vidrio inorgánicas proporcionan minerales (como alúmina-borosilicato) para el clínker de cemento.

¹⁰² Gao, P.; Yuan, S.; Han, Y.; Li, Y.; Chen, H. *Experimental Study on the Effect of Pretreatment with High-Voltage Electrical Pulses on Mineral Liberation and Separation of Magnetite Ore*. Minerals 2017, 7, 153. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/min7090153>

Debido a problemas de salud relacionados con la presencia de fibras de carbono sin quemar en el clinker (similar a la situación con el amianto), el método no se puede utilizar para procesar material compuesto con

CFRP. Como la tendencia del sector es construir palas cada vez más grandes, aumentando así el uso de CFRP, la viabilidad del coprocesamiento de palas de aerogenerador está limitado¹⁰³ (figura 26).

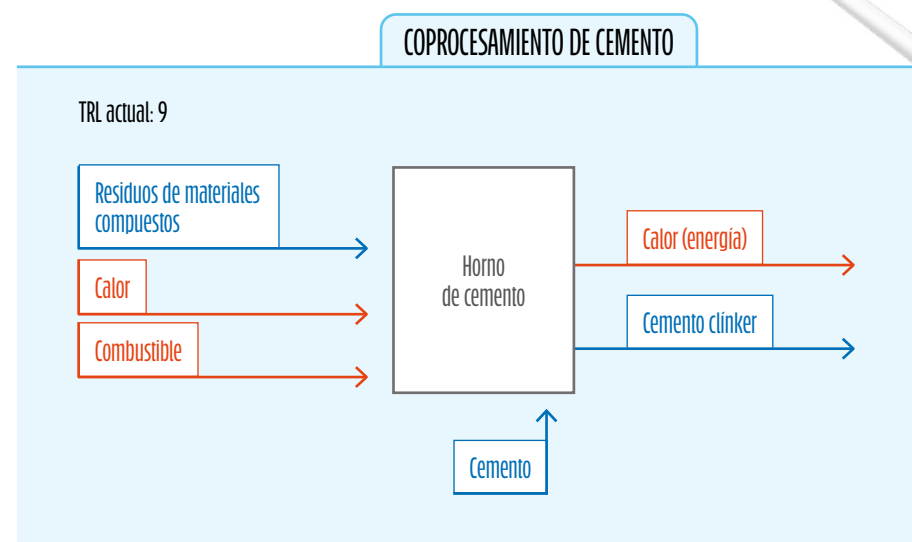


Figura 26. Esquema simplificado del proceso de coprocesamiento de cemento.
Fuente: elaboración propia a partir de ETIPWind (2019)⁶⁸.

Usos y proyectos de investigación y desarrollo

LIFE+ BRIO: <http://www.lifebrio.eu/index.php/es/>

El proyecto LIFE+ BRIO tuvo por objeto anticipar una solución viable a la gestión de los residuos procedentes de las palas de los aerogeneradores una vez que alcanzaran el final de su vida útil, al mismo tiempo que desarrollaba recomendaciones políticas y legislativas para la Comisión Europea sobre el reciclaje y la gestión del fin de vida de las palas de los aerogeneradores.

Partiendo de palas eólicas completas fuera de uso, cedidas por Scottish Power, se llevó a cabo su reciclaje en las siguientes etapas¹⁰⁴:

- Pretratamiento con triturado y reducción de tamaño (hasta 250 mm) mediante cizalla hidráulica y triturador de doble eje, obteniéndose una mezcla compuesta de espuma de poliuretano (PUR), GFRP y restos de metal.

- Recuperación de materiales y clasificación mediante combinación de tecnologías de triturado y separado (incluyendo detección por infrarrojo NIR), obteniendo como producto principal fibra de vidrio y consiguiendo apartar la mayoría de las espumas y la totalidad de los metales.
- Reducción y separación secundaria, obteniendo dos tipos de material, de diferente morfología:
 - Concentrado de fibras, compuesto mayoritariamente por grupos de fibras de vidrio cubiertas por polímero.
 - Fracción heterogénea, compuesta por una mezcla de espuma de poliuretano (PUR) y partículas finas no válidas como fibras.

Posteriormente, los dos tipos de materiales recuperados se utilizaron en la fabricación de productos para construcción:

El concentrado de fibras se empleó como fibra de refuerzo en tres tipos de prefabricados de hormigón:

módulos de acceso vertical a tuberías, barreras de seguridad tipo *New Jersey* y bloques de hormigón en masa para muros de contención. Dos productores participaron en los preparativos, la fabricación, los ensayos, la instalación y la validación de estos productos con fibras.

La fracción heterogénea se empleó junto con resinas (fenólicas y polipropileno) como material de núcleo en la fabricación de paneles sándwich mediante procesos de fabricación por compresión en caliente y laminación. El proceso experimental de fabricación incluyó las operaciones de mezclado, moldeado por calor y presión, laminación y aplicación de las capas exteriores (de fibra de vidrio virgen con resina termoestable o polipropileno).

El proyecto LIFE+BRIO tuvo una duración de 3 años (2014-2017) y una financiación de 1.107.626 €, contando con tres socios, IBERDROLA Ingeniería y construcción, como coordinador, y las fundaciones GAIKER y Tecnalia Research & Innovation, como asociados.

LIFE REFIBRE: <https://www.liferefibre.eu/>

El objetivo del proyecto LIFE REFIBRE es promover la gestión integrada de los residuos plásticos reforzados con fibra de vidrio (GFRP) que conforman las palas de aerogeneradores una vez finalizada su vida útil, promoviendo la reciclabilidad completa y de alta calidad de su compuesto mayoritario, la fibra de vidrio, para su incorporación al aglomerado asfáltico. Su duración se fijó en 3 años y 3 meses (del 01/09/2017 al 31/12/2020) y consistió en:

– Tareas de implementación:

1. Acopio, logística y pretratamiento de reducción de tamaño *in situ* de residuos de 12 palas de aerogenerador (40 t aprox.) y post tratamiento de trituración en piezas de hasta 50 cm², previo a la entrada al sistema de reciclado (Figura 27).
2. Diseño y construcción del prototipo de reciclado mecánico de los residuos de palas de aerogeneradores. El equipo cuenta con una capacidad de 100 kg/h de residuo y un rendimiento del 59 % (16 t de fibra de vidrio recuperado). El equipo consta de 4 fases en 2 equipos:



Figura 27. Operario cortando un fragmento de pala de aerogenerador. Se aprecian restos de las láminas de madera de balsa unidas al material compuesto.
Fuente: LIFE Refibre (2021)¹⁰⁵.

- Fase 1: Trituración primaria de la estructura de la pala en un molino de martillos.
- Fase 2: Separación de componentes (madera de balsa y fibra de vidrio) con mesa vibradora con barras y tamices.
- Fase 3: Trituración secundaria de la fibra de vidrio para reducir el tamaño con el molino de martillos.
- Fase 4: Separación por tamaños mediante tamizado en mesa vibradora (figura 28).

¹⁰³ ORE Catapult, University of Leeds, Fuller of the National Composites Centre (NCC) & OGTC (2021) *Sustainable decommissioning: Wind Turbine Blade Recycling*. Disponible en: https://ore.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2021/03/CORE_Full_Blade_Report_web.pdf?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc

¹⁰⁴ LIFE+ BRIO (2017). *Desmantelamiento y reciclaje de palas eólicas*. Disponible en: http://www.lifebrio.eu/wp-content/uploads/2017/10/LAYMANS_REPORT_DEFINITIVO.pdf

¹⁰⁵ LIFE Refibre (2021). *Manual de Buenas Prácticas*. Disponible en: https://www.liferefibre.eu/wp-content/uploads/2021/02/Life-Refibre-Buenas-Practicas_v2.pdf



Figura 28. Fibra de vidrio resultante.
Fuente: LIFE Refibre (2021)¹⁰⁵.

3. Incorporación máxima del 1 % de las fibras de vidrio recicladas en el aglomerado asfáltico (14,3 t), tras los respectivos estudios técnicos y la revisión de los requisitos de asfaltado según normativa.
4. Realización de tramo demostrador de carretera en Toro (Zamora) de 1.500 m x 8 m (12.000 m²), dividido en 5 secciones de 300 m de longitud con diferentes cantidades de fibra de vidrio para comparar resultados (0 %, 0,5 %, 0,75 %, 0,85 % y 1 %) (figura 29).



Figura 29. Aplicando la mezcla en el pavimento.
Fuente: LIFE Refibre (2021)¹⁰⁵.

5. Viabilidad de la implantación industrial, resultado del monitoreo durante un año del estado del pavimento de dicha carretera. Los resultados han sido:

- Aumento del 23,5 % en la resistencia a la deformación, aumento del 5,5 % de la resiliencia, aumento del 12,2 % de la resistencia a la fatiga, incremento del 16,6 % en la rigidez.
 - Por otro lado, la mezcla era más manejable por su mayor densidad, se comportaba mejor en altas temperaturas (reducción de grietas) y pequeñas mejoras acústicas.
 - Coste estimado de recuperación de 1 kg de fibra de vidrio en planta industrial de reciclado de palas (1.500 t/h) de 0,99 €/kg.
- Monitorización del impacto ambiental y socioeconómico de las acciones del proyecto mediante Análisis de Ciclo de Vida (por sus siglas, ACV). Como resultado del ACV se cuantificaron en 97 las toneladas de CO₂eq. evitadas del envío de las palas al vertedero y de 131 t de del envío a incineración.
 - Tareas de comunicación, incluyendo el plan de difusión y el *networking*, y aquellas relacionadas con la gestión y coordinación del proyecto, incluyendo la elaboración del Plan de comunicación post-LIFE.

6.1.2 Reciclaje térmico

Los tratamientos térmicos o despolimerizaciones termoquímicas agrupan las tecnologías que permiten la transformación de los polímeros de la fase matricial del material compuesto en monómeros u oligómeros mediante aporte de calor, sin que intervenga un reactivo químico en la ruptura de las cadenas. Incluye los procesos de pirólisis, pirólisis por microondas y tratamientos mediante lecho fluidizado¹⁰⁶.

Tecnologías empleadas

Pirólisis

La pirólisis es el proceso de descomposición o degradación de una sustancia por la acción del calor y en ausencia de oxígeno (a excepción del oxígeno contenido

en el propio material a tratar), por lo que no se producen reacciones de combustión. Las temperaturas de trabajo son variables desde 300 hasta más de 800 ° C.

Implica un aporte térmico que, aunque puede tener diferentes orígenes, suele proceder del calor generado durante la misma operación (figura 30).

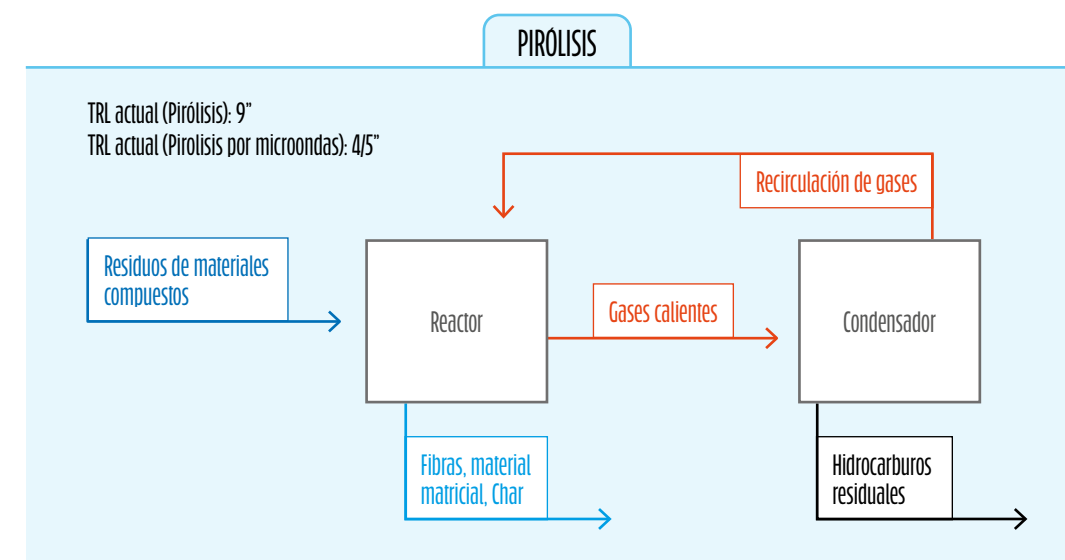


Figura 30. Esquema simplificado del tratamiento por pirólisis y pirólisis por microondas.
Fuente: elaboración propia a partir de ETIPWind (2019)⁶⁸.

Como resultado del proceso se obtienen tres productos:

- Un residuo sólido compuesto por aquellos materiales no degradables térmicamente, que no han sufrido transformación o esta ha sido mínima.
- Un residuo líquido orgánico compuesto por hidrocarburos de cadena larga, que se han formado al condensar a temperatura ambiente.
- Un residuo gaseoso de hidrocarburos ligeros de cadena corta (CO, CO₂, H₂, CH₄, etc.) y otros compuestos volátiles que se liberan tras la rotura de las moléculas orgánicas. Esta corriente gaseosa ha de ser tratada adecuadamente, pero puede ser utilizada como aporte de energía calorífica al proceso⁶.

Al aplicar la pirólisis a las palas eólicas, la matriz polimérica se degrada hasta conseguir una mezcla de hidrocarburos líquidos y obteniendo como producto sólido del proceso fibras de vidrio de menor calidad que las originales, puesto que las temperaturas de operación dañan su superficie¹⁰⁷ (figura 31).



Figura 31. Reactor piloto de pirólisis para palas de aerogenerador.
Fuente: Reciclalia.

¹⁰⁶ Centro de Estudios de Experimentación de Obras Técnicas (CEDEX), Ministerio de Fomento (2013). "Catálogo de residuos usados en construcción. Residuos plásticos. Reciclaje químico". Disponible en: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/37/residuos-plasticos/gestion-del-residuo/valorizacion-material/250/reciclaje-quimico.html>

¹⁰⁷ K. Kalkanis, C.S. Psomopoulos, S. Kaminaris, G. Ioannidis, P. Pachos (2019) *Wind turbine blade composite materials - End of life treatment methods*, Energy Procedia, Volume 157, 2019, Pages 1136-1143, ISSN 1876-6102, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218312542>

Pirólisis por microondas

La pirólisis por microondas es una pirólisis convencional que utiliza radiación electromagnética de microondas para calentar y transformar el material en una atmósfera inerte, degradando los polímeros en gases y aceite. Normalmente, en este proceso la temperatura de operación utilizada es menor porque se produce un calentamiento específico del material, desde el núcleo hacia las partes más exteriores, mejorando la velocidad de transferencia de calor y, por tanto, su eficiencia¹⁰³. Esto hace que el gasto energético y la degradación de las fibras sea menor¹⁰⁸.

Lecho fluidizado

Se trata de una variación del proceso convencional de pirólisis con alto coste y alta demanda energética que actualmente solo está disponible a escala de laboratorio, pero que ha producido fibras de carbono limpias y de buena calidad reteniendo hasta el 80 % de las propiedades mecánicas originales. Actualmente esta tecnología se encuentra en TRL 4 para la recuperación de fibra de vidrio y TRL 5 para la fibra de carbono, siendo las Universidades de Nottingham y Strathclyde, respectivamente, las que más investigaciones han realizado al respecto¹⁰³.

El proceso de reciclaje por lecho fluido se utiliza para quemar las resinas de la matriz del material compuesto y obtener como producto de la gasificación las fibras. Para ello, las palas son trituradas hasta conseguir pellets de pequeño tamaño, que son introducidos en el reactor de lecho con arena de sílice que está fluidizada por aire caliente, donde se pueden alcanzar temperaturas de hasta 550° C¹⁰. Esto calienta el material rápidamente, y degrada las resinas de la fase matricial a través de la abrasión por la arena en movimiento. Las temperaturas de funcionamiento son más bajas que en la pirólisis convencional. Una vez se ha volatilizado el polímero termoes- table, las fibras de refuerzo y cualquier relleno mineral son liberados y arrastrados por la corriente gaseosa hasta un ciclón, donde se separan. Los gases producto del proceso, son alimentados a una cámara de combustión para su total oxidación, recuperando así su energía.

Aunque permite tratar materiales mezclados o contaminados, incluyendo superficies pintadas, núcleos de espuma o inserciones de metal, este proceso no permite la recuperación de productos de la resina, aparte de los gases, mientras que la pirólisis tradicional puede permitir la recuperación de aceites líquidos con productos potencialmente valiosos. Además, las fibras de carbono también resultan más dañadas debido a la abrasión por la arena fluidizada¹⁰³ (figura 32).

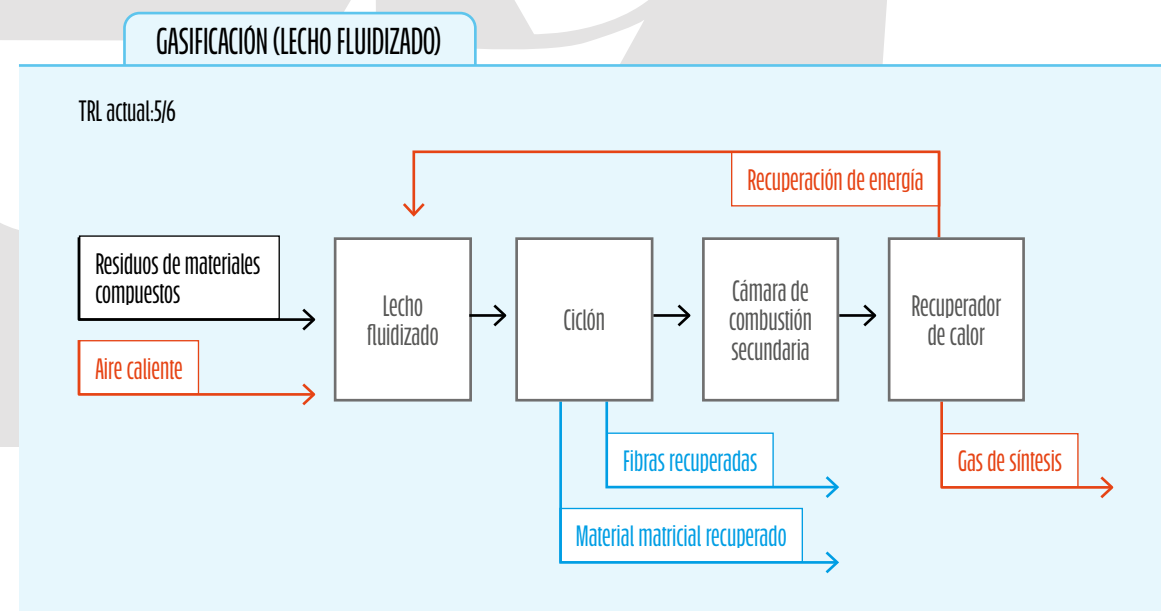


Figura 32. Esquema simplificado del tratamiento de lecho fluidizado.
Fuente: elaboración propia a partir de ETIPWind (2019)⁶⁸.

Usos y proyectos de investigación y desarrollo

Sistema CRS©: <https://reciclaliacomposite.com/crs-composite-recycled-system/>

La empresa Reciclopedia utiliza una tecnología de recuperación del material compuesto basada en un reciclado térmico controlado. El proceso permite separar la interfaz de refuerzo de los materiales compuestos, eliminando el 100 % de la materia orgánica (resinas), y

obtener una fibra de vidrio o de carbono totalmente limpia (figura 33). Es una tecnología fácilmente escalable en la que ya se está estudiando su implementación a nivel industrial que permita trabajar en un orden de magnitud de tratamiento de miles de toneladas al año para atender las necesidades de mercado¹⁰⁹. Los gases producidos durante la fase de sublimación se recogen en un sistema de tuberías extractoras y, posteriormente, son condensados para producir diferentes sub-productos.



Figura 33. Fibra de vidrio reciclada con (izq.) y sin (der.) trituración mecánica previa tras el tratamiento térmico de Reciclopedia.

Fuente: Reciclopedia.

R3FIBER: <https://www.bcircular.com/es/>

R3FIBER ha sido desarrollada por bcircular TRC (Thermal Recycling of Composites), del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y en colaboración con EDP Renováveis (EDPR) con el objetivo de permitir la recuperación integral de palas de aerogenerador y otros materiales compuestos.

El objetivo de R3FIBER es proporcionar una tecnología disruptiva y eficiente capaz de reciclar las palas de aerogenerador y otros materiales compuestos que han llegado al final de su vida útil y se están convirtiendo en un residuo emergente. R3FIBER permite obtener fibras limpias, tanto de vidrio como de carbono (sin resinas), energía y combustibles. Las fibras de alta calidad recuperados pueden ser reutilizadas en el mismo sector eólico, o en sus respectivos sectores

de origen, contribuyendo de este modo a la economía circular.

La recepción de la pala se lleva a cabo en las instalaciones de TRC, donde se ubica la planta piloto de reciclaje y se prepara la materia prima para esta fase. Mediante operaciones de corte, segregación y selección de los componentes, separando segmentos de fibra de vidrio, el núcleo de fibra de carbono, etc., se acondicionan las dimensiones de los fragmentos a las medidas del reactor. El tratamiento de reciclaje del proceso R3FIBER somete al material reforzado de fibra de vidrio y de carbono a distintas curvas de calentamiento en atmósfera y temperatura controlada y a una posterior fase de limpieza. Las condiciones del proceso permiten la descomposición de las resinas y la obtención de fibras recicladas de alta calidad (con 0% de resinas), material combustible y un gas de síntesis

¹⁰⁸ Åkesson, Dan & Foltynowicz, Zenon & Christeen, Jonas & Skrifvars, Mikael. (2013). Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 17. 1136-1142. 10.1177/0731684412453512. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/240162064_Microwave_pyrolysis_as_a_method_of_recycling_glass_fibre_from_used_blades_of_wind_turbines

¹⁰⁹ Residuos Profesional (2021). León albergará la primera planta de reciclaje de palas eólicas de la península ibérica. Fecha de consulta: 01/02/2022. Disponible en: <https://www.residuosprofesional.com/leon-planta-reciclaje-palas-eolicas/>

apto para la cogeneración. Las fibras recicladas retienen alrededor del 90 % de la resistencia a la tracción, 85 % del módulo elástico y no existe modificación en el diámetro nominal de la fibra.

Según datos de su propia web, se trata de un proceso con alta eficiencia energética y autosostenible puesto que, aunque requiere de 9.800 MJ/T de energía para la pirólisis, proporciona un total de 9.860 MJ/T entre la proporcionada por el gas y los combustibles líquidos producidos.

En algunos casos, se obtiene una mezcla de fibras y cargas que puede tener varias aplicaciones, entre ellas, como aditivo reforzante para el cemento o la fabricación de materiales vitrocerámicos, de mayor resistencia e impermeabilidad.

6.1.3 Reciclaje químico

El reciclaje químico se trata de un proceso mediante el cual se produce una separación del material compuesto por la descomposición del material polimérico en monómeros, a partir de los cuales se podrán obtener

nuevos materiales poliméricos¹⁰⁶. El reciclaje químico puede considerarse complementario al mecánico, ya que resuelve algunas de las limitaciones de este último, y suele obtener buenas calidades en la fibra recuperada, pero está menos implementado a nivel de mercado.

Tecnologías empleadas

Solvólisis

La solvólisis es un proceso de reacción química de sustitución en la que el disolvente actúa como reactivo (nucleófilo), transformando el compuesto. En función de la naturaleza del disolvente se distinguen diversas clases de solvólisis, como la hidrólisis (con agua de disolvente), alcoholisis, glicolisis (con etilenglicol), metanolisis (con metanol), etc. En el caso de las palas eólicas, los materiales compuestos pueden ser reciclados utilizando el agua como disolvente que, bajo condiciones específicas, produce la despolimerización termoquímica en la resina de la fase matricial. Este proceso provoca la ruptura de los enlaces de las resinas termoestables, permitiendo su separación de las fibras de vidrio¹⁰ (figura 34).

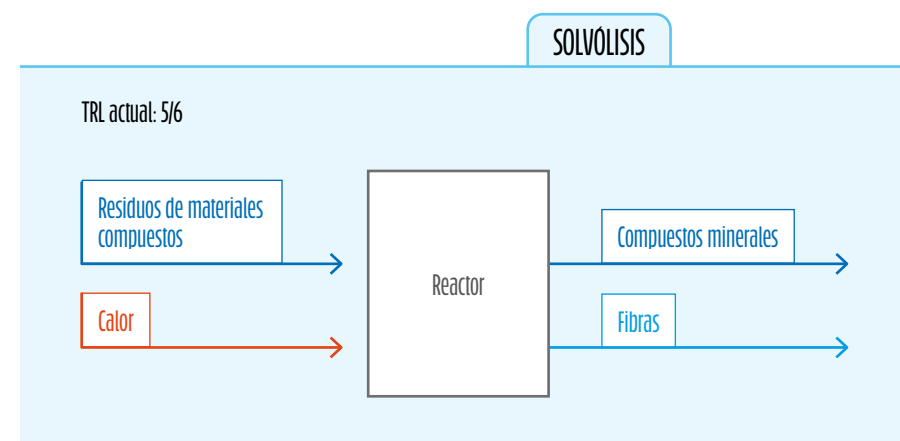


Figura 34. Esquema simplificado del tratamiento de solvólisis.
Fuente: elaboración propia a partir de ETIPWind (2019)⁶⁸.

Usos y proyectos de investigación

Proyecto CETEC

El proyecto CETEC (Economía Circular para Compuestos Termoestables y Epoxi) es una iniciativa de colaboración entre la industria y el mundo académico, impulsada por los mismos socios que el proyecto

DREAMWIND (véase apartado 6.1.5), para desarrollar una tecnología a escala industrial y comercializable que permita la circularidad de los compuestos termoestables.

Este proyecto aborda la falta de tecnología de reciclaje disponible para resinas epoxi y consiste en un proceso de dos pasos: en primer lugar, los compuestos termoestables se desmontan en fibra y epoxi. En se-

gundo, mediante un nuevo proceso de ciclo químico, el epoxi se descompone aún más en componentes básicos similares a los materiales vírgenes. Luego, estos materiales pueden reintroducirse en la fabricación de nuevas palas de aerogeneradores, lo que constituye una nueva vía de circularidad para la resina epoxi¹¹⁰.

El proyecto ha sido financiado parcialmente por el Fondo de Innovación de Dinamarca (IFD) y está encabezado por Vestas y con Olin, productor líder mundial de epoxi, el Instituto Tecnológico Danés (DTI) y la Universidad de Aarhus, como colaboradores.

Proyecto EROS

El proyecto EROS tiene como objetivo principal implantar un sistema real de economía circular partiendo del reciclaje de palas eólicas y residuos procedentes del sector aeronáutico para ser transformados y utilizados en otros sectores como la industria cerámica, concretamente en los soportes de las baldosas cerámicas, y los elementos que componen sus superficies, tales como esmaltes, fritas cerámicas y tintas para la decoración. La tecnología, mediante un proceso de triturado mecánico y reciclado químico, persigue obtener fibras y glicoles que se introducirán en el sistema productivo de fabricación de baldosas cerámicas, fritas, esmaltes, tintas y composites para el sector aeronáutico¹¹¹. Las entidades colaboradoras son AIMPLAS, Keraben Grupo, S.A., ITC, Recicla-lia S.L., Sofitec AER y Fritta, S.L.

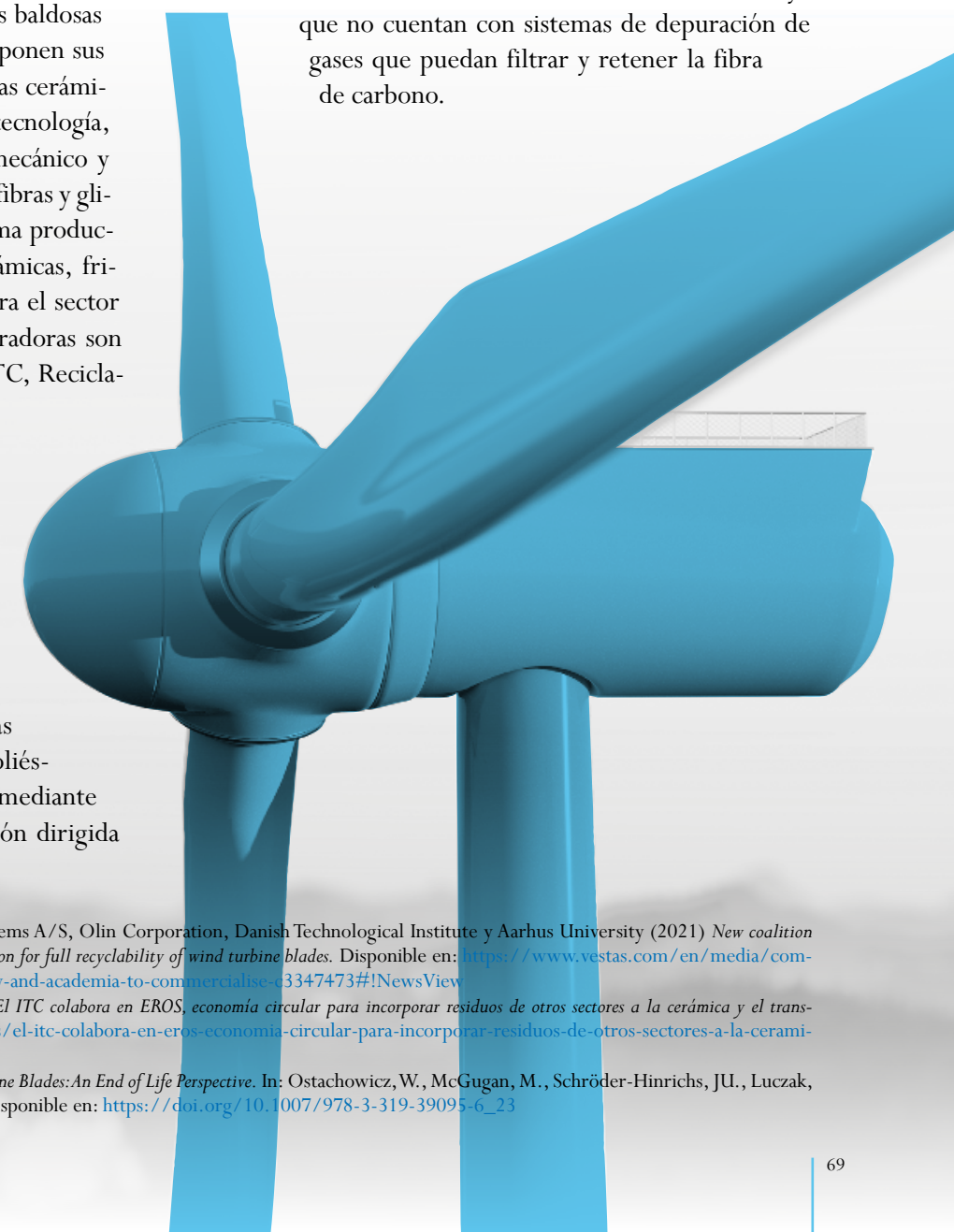
Proyecto BIZENTE: <https://bizente.eu/>

El proyecto BIZENTE está estudiando una tecnología biocatalítica para la biodegradación en reactores químicos de materiales compuestos, concretamente para las resinas termoestables de epoxi, poliéster y viniléster, pero en este caso mediante la utilización de enzimas de evolución dirigida

(mutadas) de la familia de las ligninasas. Los colaboradores en este proyecto son aitiip, EvoEnzyme, la Universidad Tecnológica de Delft, ECRT, Specific Polymers, Biosphere, la Universidad de Cádiz, el Aeropuerto Internacional de Teruel, Acciona y Aernnova Engineering.

6.1.4 Valorización energética

Una opción no demasiado óptima es la valorización energética del material compuesto de las palas de los aerogeneradores en incineradoras para recuperar energía. La fase dispersa con GFRP no presenta un elevado poder calorífico, por lo que no es buen combustible y puede dañar los hornos y demás maquinaria de la incineradora¹¹². Como ya se ha dicho, las fibras de la fase dispersa de CFRP pueden presentar problemas para la salud similares al asbesto al combustionar en instalaciones de residuos sólidos urbanos, ya que no cuentan con sistemas de depuración de gases que puedan filtrar y retener la fibra de carbono.



¹¹⁰ Comunicado de prensa de Vestas Wind Systems A/S, Olin Corporation, Danish Technological Institute y Aarhus University (2021) *New coalition of industry and academia to commercialise solution for full recyclability of wind turbine blades*. Disponible en: <https://www.vestas.com/en/media/company-news/2021/new-coalition-of-industry-and-academia-to-commercialise-c3347473#!NewsView>

¹¹¹ Instituto Tecnológico de Cerámica (2020) *El ITC colabora en EROS, economía circular para incorporar residuos de otros sectores a la cerámica y el transporte*. Disponible en: <https://www.itc.uji.es/el-itc-colabora-en-eros-economia-circular-para-incorporar-residuos-de-otros-sectores-a-la-ceramica-y-el-transporte/>

¹¹² Beauson, J., Brondsted, P. (2016). *Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective*. In: Ostachowicz, W., McGugan, M., Schröder-Hinrichs, J.U., Luczak, M. (eds) MARE-WINT. Springer, Cham. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-39095-6_23

6.1.5 Casos de utilización como material estructural

Una vez que finaliza la máxima vida útil de los aerogeneradores, su destino es el reciclaje o la valorización, y, en los casos en los que ninguno de estos tratamientos sea posible, su depósito en vertedero. Debido a la ausencia de normativa específica que regule la gestión de los residuos de aerogeneradores, WindEurope y AEE, como asociaciones representantes del sector hicieron un llamamiento en junio de 2021 en el que solicitaban la prohibición en toda Europa del traslado de las palas de aerogeneradores a vertedero para 2025¹⁰.

Por este motivo, se han venido planteado alternativas para la gestión de estos residuos. Una de ellas es la utilización de las palas en propósitos arquitectónicos o estructurales (sin relación con su sector de origen) debido a la resistencia y las características mecánicas que presentan sus materiales, además de la ausencia de sustancias peligrosas que produzcan daños medioambientales o a la salud humana. Esta operación de valorización tiene como fin último el reciclado de parte de la pala como material estructural o arquitectónico.

Hasta la fecha se han desarrollado pocos proyectos de este tipo, ya que el número de residuos generados todavía no es elevado. No obstante, se trata más bien de propuestas de utilización a menor escala como soluciones puntuales para evitar el depósito en vertedero y no se han diseñado, por ahora, para su producción en gran escala, ya que con estas propuestas no se podrían

gestionar todas las toneladas de residuos previstas en un futuro cercano. Entre los proyectos que se han llevado a cabo hay que destacar:

- **Creación de mobiliario urbano** (bancos, parques infantiles¹¹³, aparcamientos para bicicletas¹¹⁴, puentes, , entre otros) y barreras acústicas para vías ferroviarias o carreteras. Para estos proyectos suelen emplearse las palas de los aerogeneradores, debido a que no poseen una estructura interna compleja y son resistentes, sin que se requiera grandes modificaciones sobre las mismas.
- **Uso como reservorios de agua para múltiples usos.** Como ya se ha comentado antes, los componentes de los aerogeneradores están fabricados a partir de compuestos que no contienen sustancias tóxicas que puedan alterarse al entrar en contacto con otras sustancias. Esto hace que sea posible el uso de las palas de los aerogeneradores como reservas de agua destinada a múltiples usos, como riego, higiene o para combatir incendios en zonas en las que el acceso a este recurso sea limitado. Por ejemplo, una pala de 70 m de longitud tiene alrededor de 150 m³ de volumen interno⁹. El problema que presenta esta técnica es que es necesario realizar un desmonte de una gran superficie de terreno para poder enterrar la pala, lo que puede ocasionar problemas en el suelo y la estructura vegetal de la zona.

- **Otros usos.** Actualmente se encuentra bajo investigación o en fases incipientes de desarrollo el uso de palas de aerogeneradores para la fabricación de asientos de gradas, barreras acústicas en carreteras, atenuadores de olas en las zonas costeras o torres de comunicación. También se encuentra en investigación el uso de las palas como material para impresión 3D, pero para esto es necesario procesar y convertir en polvo el material de partida. La empresa encargada de llevar a cabo estas investigaciones es Re-Wind¹¹⁵.
- **Utilización en las estructuras de torres de transmisión de electricidad o como techos de viviendas.** Estas propuestas actualmente se encuentran en fase de desarrollo teórico, por lo que es más difícil que se puedan llevar a cabo a corto plazo, pero pretenden usar las características estructurales e impermeables de estos materiales para su aplicación en cubiertas de viviendas o como torres eléctricas, debido a sus características estructurales.

6.1.6 Otras áreas de investigación

Covestro, en asociación con el gigante chino de turbinas eólicas Goldwind y el fabricante de palas eólicas LZ Blades, han desarrollado la primera pala de turbina

eólica del mundo de 64,2 m hecha completamente de resina de poliuretano, demostrando la idoneidad del material como solución rentable para la energía eólica. Además de reducir significativamente el coste de producción respecto a las soluciones con resinas epoxi tradicionales, las pruebas demostraron que la resina de poliuretano también mejora las propiedades mecánicas de la pala y acorta el tiempo de curado¹¹⁶.

Arborea Intellbird e Innovagenomics llevaron a cabo un estudio en el que documentaron la existencia de comunidades microbianas sobre la superficie de las palas capaces de degradar las resinas epoxi, lo que pone de manifiesto la posibilidad de desarrollar tecnologías de bioprocesado del material compuesto¹¹⁷.

Proyecto DREAMWIND: <https://www.dreamwind.dk/>

El proyecto Dreamwind (*Designing REcyclable Advanced Materials for WIND energy*) es un proyecto de investigación entre la Universidad de Aarhus, Vestas y el Instituto Tecnológico Danés sobre el desarrollo de nuevos materiales compuestos reciclables de alta resistencia para las palas de los aerogeneradores, el componente más complejo de reciclar. El desarrollo de estos materiales se basa en que puedan ser fácilmente separables al finalizar la vida útil de la turbina, incorporando recursos de base biológica en el agente aglutinante.

El proyecto fue subvencionado por el Fondo de Innovación de Dinamarca con 2,36 millones de euros y ha tenido una duración de 4 años (marzo 2016 - marzo 2020).

¹¹³ <https://re-use.eu/blade-made/>

¹¹⁴ <https://www.spglobal.com/marketingintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/grappling-with-blade-recycling-wind-sector-buys-time-with-life-extensions-60567157>

¹¹⁵ <http://www.re-wind.es/index.html>

¹¹⁶ Covestro (2020). La primera pala de aerogenerador de resina de poliuretano de 64,2 m del mundo. Disponible en: <https://solutions.covestro.com/en/highlights/articles/cases/2020/goldwind-lz-blades-wind-turbine-blade-success>

¹¹⁷ Bernabéu & Solera (2017) Auditoria profunda de palas de aerogeneradores con SARP, la importancia del factor BIO. Disponible en: http://www.civildron.com/wp-content/uploads/2018/11/8_12_Auditoria_profunda_de_palas_de_aerogeneradores_con_SARP_la_importancia_del_factor_Bio_ARBOREA_fenercom-2017.pdf

Proyecto ZEBRA

El proyecto ZEBRA (*Zero waste Blade Research*), impulsado por IRT Jules Verne y a través de un consorcio estratégico, ha reunido a empresas industriales y centros técnicos para demostrar a gran escala la relevancia técnica, económica y medioambiental de las palas de aerogeneradores termoplásticos, con un enfoque que representa la cadena de valor completa: desde el desarrollo de materiales y el ecodiseño, hasta la fabricación de las palas, la operación y el desmantelamiento de los aerogeneradores y, finalmente, el reciclaje del material de la hoja al final de su vida útil.

LM Wind Power diseñará, procesará y fabricará dos palas prototipo utilizando la resina *Elium*® de Arkema (reciclable mediante despolimerización) con el fin de probar y validar el comportamiento del material compuesto y su viabilidad para la producción industrial. Paralelamente, los socios del proyecto ZEBRA se centrarán en desarrollar y optimizar el proceso de fabricación mediante el uso de la automatización para reducir el consumo de energía y los residuos de la producción. A continuación, se explorarán métodos para reciclar los materiales utilizados en los prototipos de palas y convertirlos en nue-

vos productos. Finalmente, un análisis del ciclo de vida evaluará la viabilidad ambiental y económica de seguir utilizando el material termoplástico en futuras palas de turbinas eólicas.

Entre los colaboradores figuran IRT Jules Verne, Arkema, CANOE, ENGIE, LM Wind Power, Owens Corning y el Grupo SUEZ. El proyecto se ha puesto en marcha por un periodo de 42 meses con un presupuesto de 18,5 millones de euros¹¹⁸.

Proyecto FiberEUse: <http://fibereuse.eu/>

FiberEUse pretende, a través de un enfoque holístico y a gran escala, la demostración técnica, ambiental y económicamente viable de la integración de tecnologías innovadoras de refabricación que permitan una mejor reutilización de los materiales compuestos de GFRP y CFRP reciclados mecánica o térmicamente. Esto permitirá una mayor facilidad de operación, una reducción de costes, la exploración de nuevos mercados y la minimización de los impactos ambientales en cumplimiento con las Directivas de la UE. Con estas nuevas cadenas de valor se realizarán tres casos de demostración que cubrirán diferentes sectores de fabricación, estando sujetos a una evaluación del Ciclo de Vida (LCA, ISO 14044/44)¹¹⁹ y al programa de Verificación de Tecnología Ambiental (ETV)¹²⁰ de la UE. A su vez, cada uno de estos grandes casos de uso generará varios casos de demostración para cerrar el ciclo del ciclo de vida del compuesto en diferentes sectores industriales desde el punto de vista de la economía circular.

- Caso 1: reciclaje mecánico de fibras cortas de vidrio y reutilización en aplicaciones personalizadas de valor agregado, incluidos muebles, productos deportivos y creativos. Se utilizarán tecnologías de fabricación emergentes como la impresión 3D asistida por UV y la metalización por deposición física de vapor.

- Caso 2: Reciclado térmico mediante pirólisis controlada de fibras largas de vidrio y carbono procedentes de aerogeneradores al final de su vida útil y componentes aeroespaciales, y reutilización posterior en los sectores de la automoción y la construcción.
- Caso 3: Inspección, reparación y remanufactura de productos de CFRP al final de su vida útil, implementando criterios de diseño y de fabricación adaptativos en aplicaciones de alta tecnología del sector de la automoción.

Además, el desarrollo de esta estrategia de innovación creará conexiones entre todas las partes interesadas de los sectores relacionados con los compuestos, desde fabricantes de equipos originales (OEM) hasta proveedores, operadores logísticos, explotadores de tecnología, diseñadores y asociaciones de usuarios finales, proporcionando una plataforma para la comunicación y difusión de los resultados, con idea de alinear las normativas regulatorias, metodologías y precios.

FiberEUse es un proyecto de investigación de 9,8 millones de euros financiado por la Unión Europea desde junio de 2017 y en colaboración con 20 socios de 7 países de la UE.

Proyecto DecomBlades: <https://decomblades.dk/>

Proyecto danés iniciado en 2021 y de tres años de duración que persigue establecer cadenas de valor sostenibles y funcionales para gestionar las palas de las turbinas eólicas al final de su vida útil desde el desmantelamiento hasta la remanufactura y el reciclaje en nuevas aplicaciones, centrándose en las tres tecnologías más maduras y rentables: trituración mecánica, coprocesamiento de cemento y pirólisis.

El proyecto ha sido cofinanciado por el Fondo de Innovación Danés y cuenta con los siguientes socios: Vestas Wind Systems, Siemens Gamesa Renewable Energy, LM Wind Power, Ørsted, HJ Hansen Recycling, MAKEEN Power, FLSmidth, University of Southern Denmark (SDU), Technical University of Denmark (DTU) y Energy Cluster Denmark (ECD).

Proyecto HiPerDiF

La tecnología HiPerDiF (Fibra Discontinua de Alto Rendimiento), desarrollada en la Universidad de Bristol, produce compuestos de fibra discontinua altamente alineados con el objetivo de abordar los problemas de la industria de composites: fabricación y reciclaje. El proceso emplea una serie de chorros de agua dirigidos perpendicularmente a una serie de placas ranuradas para alinear la fibra. Después se seca mediante vacío e infrarrojos y se pasa a la fabricación de preformas del material.

Independientemente de los procesos de degradación de la matriz, las fibras recuperadas fabricadas con tecnología HiPerDiF se encuentran en forma de filamentos aleatorios y de baja densidad y permiten ser remanufacturadas, tras su reciclaje, en otros compuestos con buenos rendimientos mecánicos. Esta investigación ha sido financiada por el Consejo de Investigación de Ingeniería y Ciencias Físicas del Reino Unido (EPSRC)¹²¹.

Proyecto ReRoBalsa

El Instituto Fraunhofer de Investigación en Madera (WKI), en Alemania, coordina el proyecto ReRoBalsa, que pretende el desarrollo de una tecnología de reciclaje innovadora para la recuperación de madera de balsa y espuma plástica de las palas del rotor para la fabricación posterior de esteras aislantes ultraligeras de fibra de madera que proporcionen aislamiento similar al de los materiales comunes a base de poliestireno. Además de producir astillas y fibras de madera, que sirven como base para tableros de partículas aglomerados, también se produce una espuma de madera elástica tras su molido y mezcla con agente espumante que es adecuada para su uso como aislante o como material de embalaje ecológico¹²².

El proceso comienza con el desmantelamiento *in situ* de las palas del aerogenerador en piezas transportables mediante el empleo de una sierra de hilo diamantado. Posteriormente, en la planta se diseccionan en un tamaño manejable para las unidades de procesamiento y se produce la separación de los materiales de relleno del GFRP. Esta separación consta de varias

¹¹⁸ IRT Jules Verne (2020) IRT Jules Verne launches 'ZEBRA project' to develop 100% recyclable composite wind turbine blades with industrial partners. Disponible en: https://irt-jules-verne.fr/wp-content/uploads/06_IRT-JULES-VERNE_CP-ZEBRA_EN_final.pdf

¹¹⁹ ISO 14044:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/38498.html>

¹²⁰ https://green-business.ec.europa.eu/eu-environmental-technology-verification_en

¹²¹ Bristol Composites Institute (2020) HiPerDiF - High Performance Discontinuous Fibre. Disponible en: <http://www.bristol.ac.uk/composites/research/hiperdif/#dropdown-heading0-0>

¹²² Residuos Profesional (2020) Investigadores alemanes desarrollan un sistema para reciclar las palas de los aerogeneradores. Disponible en: <https://www.residuosprofesional.com/sistema-reciclar-palas-aerogeneradores/>

etapas: la primera consiste en la mezcla de materiales que son cortados para producir piezas con un tamaño máximo de 50 mm. En la segunda etapa se trituran nuevamente mediante una trituradora de flujo cruzado o mediante reactor de impacto al tiempo que se agregan materiales de desecho húmedos de la industria papelería para atrapar el polvo¹²³.

Proyecto EOCENE

El proyecto, enmarcado dentro del programa MIS- SIONS del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial E.P.E (CDTI) y cofinanciado con fondos FEDER, está dotado con 9 millones de euros de presupuesto durante sus 3 años de duración y cuenta con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación a través de su iniciativa: “Misiones de Ciencia e Innovación”¹²⁴. Está liderado por el Grupo Cosentino, e incluye un consorcio de empresas como Acciona, Suez, Kimitec, Aerotecnic y Omar Coatings, cubriendo toda la cadena de valor, además de 13 entidades de investigación y universidades, como el Centro Tecnológico AITTIP, el Instituto de Catálisis y Petroleoquímica de la CSIC o las Universidades de Almería, Granada, Málaga o la Politécnica de Valencia, entre otros¹²⁵.

El proyecto EOCENE tiene dos objetivos principales: formular, desarrollar y validar nuevos materiales compuestos para que todos sus elementos procedan de fuentes renovables; y elaborar e implementar estrategias avanzadas de valorización y reciclado de los residuos de composite producidos en los sectores de aeronáutica, construcción y la decoración de interiores y arquitectura. Ambos objetivos se combinarán de forma sinérgica para lograr una nueva generación de compuestos altamente sostenibles, gracias al fomento de prácticas circulares entre las empresas del consorcio. Dentro del proyecto se espera conseguir¹²⁶:

- Obtención de monómeros a partir de residuos de la industria agroalimentaria, de la industria de los composites y fuentes renovables (aceites vegetales, lignina y celulosa).

- Formulación de nuevas bioresinas termoestables de tipo epoxi, poliéster y viniléster (alternativas a las petroquímicas).
- Desarrollo de nuevos procedimientos avanzados para conseguir cargas y fibras de altas prestaciones técnicas procedentes de residuos y otras fuentes de alta disponibilidad.
- Investigación tecnológica sobre la modificación y funcionalización de diferentes vías para la mejora de la reciclabilidad de los composites termoestables.

IEA Wind Task45

La Tarea 45 (*Task45*) es uno de los 39 Acuerdos de Implementación o Programas de Colaboración Tecnológica (TCP) de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) que pretende identificar y mitigar las barreras para el reciclaje de las palas de las turbinas eólicas a través de resultados tangibles para el sector eólico. La tarea se centra en tres áreas principales: los aspectos técnicos del reciclaje de palas de aerogeneradores; el análisis de la cadena de valor del reciclaje y su impacto ambiental, social y económico; y las normas, certificaciones y legislación que enmarcan las actividades relacionadas con el reciclaje de palas de aerogeneradores¹²⁷.

Proyecto The Circular Wind Hub

The Circular Wind Hub tiene el objetivo general de mejorar la circularidad de los materiales en la industria eólica, así como de mantenerlos en los mercados europeos al finalizar su vida útil cumpliendo los mínimos de calidad para asegurar su viabilidad económica. Concretamente, persigue establecer nuevas políticas circulares para las turbinas eólicas, desarrollar estrategias óptimas al final de su vida útil, y desarrollar una infraestructura industrial para gestionar sus flujos de residuos.

El proyecto se ha dividido en tres fases: en la fase 1 (*Moonshot Circular Windfarms*), desarrollada a lo largo

de 2020, se buscaron soluciones para retener los materiales críticos de los parques eólicos, tanto en forma de componentes como de materiales, movilizandolos a las empresas del sector de la energía eólica y elaborando estrategias circulares para las agendas de acción circular. En la fase 2 (en curso), las partes interesadas están desarrollando los temas específicos y concretos de dichas agendas, con vistas a ser ejecutadas en la fase 3.

Esta fase 2 comprende la creación del *Circular Wind Hub* como punto central de colaboración entre empresas, ONG, institutos tecnológicos y organizaciones gubernamentales. El Circular Wind Hub se compone de distintos ejes (*Policy, Knowledge, and Industrial Hub*) y diversos grupos de trabajo, que se reúnen una vez al mes para focalizar los temas y avances en los trabajos, así como detectar nuevas oportunidades¹²⁸.

6.2 Otros materiales

6.2.1 Acero y metales varios

La mayoría de los grandes aerogeneradores se sustentan con torres tubulares tronco-cónicas de acero, atendiendo a diseños aerodinámicos y de servicio y fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos y unidas con pernos *in situ*. El diámetro de estas secciones oscila entre los 2,3 y los 3,9 m con unos espesores de entre 14 y 60 mm, haciendo un peso total de entre 130 y 307 t¹²⁹, dependiendo también de la altura del aerogenerador, que puede llegar los 200 m.

La función de la torre es permitir instalar el rotor a la altura de proyecto óptima para el aprovechamiento del recurso eólico y soportar la góndola que contiene los componentes fundamentales del conjunto (sistema de generación, multiplicadora, sistemas de control asociados, etc.) y las palas, cuyo peso total puede

alcanzar las 70 t. Torres de semejante peso y altura también requieren de consistentes cimentaciones de hormigón armado con acero inoxidable corrugado¹³⁰ (véase figura 9).

La torre representa un elemento económico importante del aerogenerador ya que su precio supone alrededor del 20 % del coste total de la turbina⁵⁵. Esto ha provocado que se investiguen otras opciones a las torres de acero tradicionales y, aunque existen en el mercado soluciones alternativas, como las torres híbridas (primera media sección de hormigón y último tramo de acero) o torres totalmente compuestas por hormigón, la gran mayoría de las torres siguen siendo torres tubulares de acero. Las tecnologías de futuro pasan por torres de acero de conchas atornilladas o de celosía cubiertas con paneles plásticos.

¹²³ Fraunhofer (2017) *Recycling of rotor blades in order to recover balsa wood and plastic foam for the insulation materials production*. Disponible en: https://www.wki.fraunhofer.de/en/research-projects/2017/ReRoBalsa_rotor-blades-recycling-balsa-wood-plastic-foam-for-insulation-materials.html

¹²⁴ <https://www.cdti.es/index.asp?MP=100&MS=902&MN=2&mssclid=4f0633ddba5711ecb73371476adef7d>

¹²⁵ Cosentino (2021) *Cosentino lidera un proyecto de investigación en Economía Circular*. Disponible en: <https://www.cosentino.com/es/noticias/cosentino-lidera-un-proyecto-de-investigacion-en-economia-circular/>

¹²⁶ Kimitec (2021) *Alianza de Cosentino y Kimitec, dos gigantes de la industria almerienses, juntos por la Economía Circular - Proyecto EOCENE*. Disponible en: <https://kimitec.com/proyecto-eocene-alianza-de-cosentino-y-kimitec/>

¹²⁷ IEA (2019). *IEA Wind TCP Task45: Enabling the Recycling of Wind Turbine Blades*. Disponible en: <https://iea-wind.org/task45/>

¹²⁸ ECHT (2020) *The Circular Wind Hub*. Disponible en: <https://www.echtzichtbaar.com/circular-wind-hub/>

¹²⁹ EDP Renewables (2014) *El acero en el sector eólico. Innovación en acero para requerimientos del sector energético*. Plataforma Tecnológica Española del Acero. Madrid, 3 de diciembre de 2014. Disponible en: <https://aceroplatea.es/docs/09-%20Acero%20en%20el%20sector%20eolico.pdf>

¹³⁰ Arquitecturaenacero (2021). Artículo *El acero en las torres de generación eléctrica eólica* de Francis Pfenniger (Arquitecto editor).

Aunque la mayoría del acero se localiza en la torre, también hay otros elementos en el aerogenerador constituidos total o parcialmente de acero, como el buje, la multiplicadora, el generador y otros elementos de la maquinaria interna o de la propia góndola. También hay acero en las propias palas, en las sujeciones al buje y los rodamientos, pero inferior al 3 % del peso total de la pala¹⁰.

En principio, el reciclado del acero de los aerogeneradores no presenta problema, puesto que se trata de un material fácilmente recuperable y muy fácilmente reciclable. La obtención de acero reciclado me-

dante la refundición de la chatarra es un proceso que puede repetirse numerosas veces, ya que mantiene la calidad y propiedades del material original, y cuenta con un mercado maduro y consolidado en Europa de consumo de acero reciclado, encabezado por el sector de la construcción¹³¹. No todos los aceros presentes en los aerogeneradores son igual de reciclables. Por ejemplo, los aceros al carbono y otras aleaciones con propiedades magnéticas son los más reciclables y, por el contrario, los de menor magnetismo, como algunas aleaciones del acero inoxidable, pueden serlo en menor medida¹³².

El valor de la chatarra de acero como material 100 % reciclable hace que en lugar de enviarse a un centro de tratamiento (como ocurre con el resto de residuos de otros materiales) sea vendido directamente a depósitos de chatarra. Tras la recolección, el acero se clasifica en la chatarrería y se manda a las acerías o fundiciones para volverlo a fundir y purificarlo para eliminar posibles contaminantes, solidificarlo en láminas u otras piezas y reintroducirlo en el mercado para su uso como materia prima¹³².

6.2.2 Hormigón y tierras excavadas

El hormigón y la propia tierra excavada junto a las barras de acero corrugado del armado, son los principales residuos resultantes del proceso del desmantelamiento de la cimentación de un aerogenerador. Según estimaciones de WindEurope, con el desmantelamiento de 9 GW de parques eólicos en 2030 se podrían generar alrededor de 3,7 millones de toneladas de RCD. Sin embargo, la tecnología para la separación y recuperación de RCD está bien establecida, es accesible y, normalmente, económica. Además, el hormigón, al igual que el aluminio o el acero, tiene la ventaja de ser un material que puede ser reciclado repetidas veces.

Como suele ser habitual en otras obras con generación de RCD, no es viable ambiental ni económicamente transportar los RCD excesivamente lejos del punto de recuperación, y es preferible reutilizarlos en el mismo punto o en áreas cercanas. Para ello existen plantas móviles de trituración que, de ser necesario, permiten tratar y separar *in situ* el árido reciclado,

pudiendo incluso ser utilizado, si procede, a modo de relleno del hueco resultante del aerogenerador.

Posteriormente a la trituración, los áridos se clasifican por tamaño para facilitar su posterior uso en grueso y fino. El porcentaje del árido grueso varía entre 70-90 % de la masa total del hormigón original, teniendo una distribución granulométrica que la hace apta para su aplicación en prácticamente todo tipo de proyectos, además de para la producción de nuevos tipos de hormigón. La densidad del árido reciclado es similar a la del hormigón original y ligeramente inferior a la de un árido de primer uso (5-10% menor)¹³³.

6.2.3 Madera de balsa

La madera de balsa procede de la especie tropical *Ochroma pyramidale* (familia Malvaceae), originaria de

las selvas centro y suramericanas, aunque cultivada también en otras áreas del mundo. El árbol alcanza una altura de 20 o 25 metros, con troncos de 75 a 90 cm de diámetro, siendo una especie de rápido crecimiento con ciclos de tala cortos cada 4 o 5 años. Esta especie es comúnmente conocida como “balso”, puesto que históricamente su madera ha sido ampliamente utilizada en la construcción de balsas para navegar, dada su ligereza y flexibilidad.

La llamada “madera de balsa” es poco nervuda, de color claro, blanda (0,3 en el test de Monnin y 3000 N según la escala Janka)¹³⁴ y con una alta flotabilidad. Esto se debe a que su densidad oscila entre los 100 y los 200 kg/m³, con una típica de 140 kg/m³, lo que representa un tercio de la densidad de otras maderas más duras y la convierte en la más liviana que se conoce (figura 35).



Figura 35. Balso (*Ochroma pyramidale*) en Costa Rica.

Fuente: Gabriele Kothe-Heinrich (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ochroma_pyramidale_Costa_Rica_1.jpg)

Los principales países exportadores de madera de balsa son Ecuador (80 %), Indonesia (10 %) y Papúa Nueva Guinea (10 %). Concretamente, durante el año 2020, las exportaciones de Ecuador se dirigieron hacia Asia (77 %), Europa (12 %) y América (11 %)¹³⁴.

Actualmente es un material ampliamente utilizado con multitud de aplicaciones en arquitectura, modelismo y, especialmente, en aeronáutica (tanto en aeronaves y embarcaciones, como en el sector de la energía eólica).

¹³¹ EuRIC aisbl (2020) *Metal Recycling Factsheet*. Belgium, EU. Disponible en: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/eu-ric_metal_recycling_factsheet.pdf

¹³² Ferros Planes (2021) *Reciclado de acero: ¿qué procesos implica, qué beneficios tiene y qué soluciones comerciales ofrece?* Disponible en: <https://ferrospanes.com/reciclado-de-acero/>

¹³³ Structuralia (2020) *El reciclado del hormigón y sus enormes ventajas medioambientales*. Disponible en: <https://blog.structuralia.com/el-reciclado-del-hormigon-y-sus-enormes-ventajas-medioambientales>

¹³⁴ AEE (2021) *La fabricación de las palas de los aerogeneradores y el uso de la madera de balsa en su fabricación*. Disponible en: <https://aeeolica.org/wp-content/uploads/2021/11/30nov2021-La-fabricacion-de-las-palas-de-los-aerogeneradores-y-uso-de-la-madera-de-balsa-en-su-fabricacion.pdf>

Respecto al uso de la madera de balsa en las palas de los aerogeneradores, esta se encuentra formando parte de la estructura interna del laminado (concretamente el núcleo de una distribución tipo sándwich) (figura 36) y en el puente interior (véase figura 19). Una pala de rotor de 50 m de largo tiene una superficie total aproximada de 300 m². Toda la superficie de madera de balsa contenida (unos 180 m²) produce un volumen de aproximadamente 3,6 m³ de madera de balsa, a lo que hay que sumar el puente interior que, con una superficie de aprox. 80 m² y un espesor de 30 mm, aporta un volu-

men adicional de 2,4 m³ de madera de balsa. Esto hace que cada aerogenerador contenga alrededor de 15 m³ de madera de balsa¹²², lo que supone tan solo entre el 1 y el 3 % de este material respecto al total del aerogenerador en modelos antiguos. La corriente entre los fabricantes es la sustitución progresiva de la madera de balsa por PET y PVC en los próximos años. Es notorio mencionar que la madera de balsa que se está utilizando actualmente en la fabricación de palas de aerogenerador en España siempre cuenta con certificaciones de sostenibilidad (FSC o equivalente)¹³⁴.

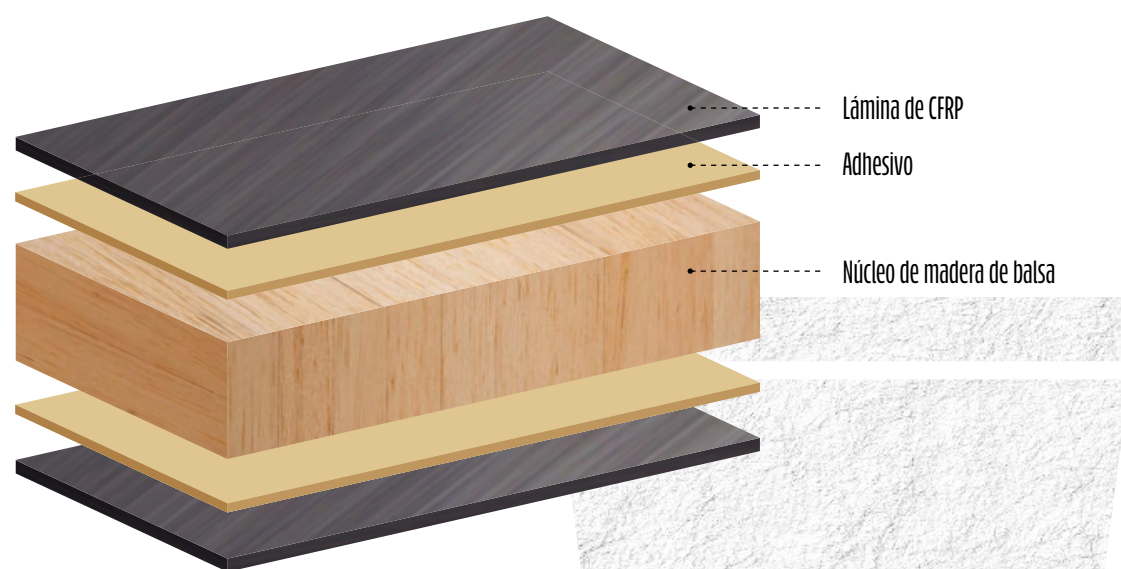


Figura 36. Sección de panel tipo sándwich con núcleo de madera y capas externas de Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP).
Fuente: Elaboración propia a partir de Zaharia et al. (2017)¹³⁵.

Las uniones en las palas del rotor de la madera de balsa al material compuesto laminado (GFRP o CFRP) están realizadas normalmente con resinas epoxi o poliéster, lo que lo convierte en un vínculo extremadamente fuerte. Actualmente la madera de balsa no es un material que se recupere fácilmente, precisamente por la dificultad de separarlo del resto del material compuesto laminado, y normalmente es enviado a valorización, pese a su pobre contenido energético, o se dispone en vertedero.

6.2.4 Aceites, líquidos hidráulicos y lubricantes

Como norma general, los aceites, líquidos hidráulicos y demás lubricantes usados en aerogeneradores y demás maquinaria industrial son residuos muy contaminantes, ya que, durante su utilización, se degradan originando sustancias tóxicas y metales pesados que se producen por la exposición a altas temperaturas y presión dentro de los motores, máquinas y procesos donde se utilizan. Están considerados residuos peligrosos

y, por tanto, han de ser gestionados por un gestor de residuos peligrosos autorizado.

En las turbinas eólicas, los aceites de transmisión minimizan la fricción y el desgaste entre las superficies de los componentes eliminando el calor que se forma como resultado de la acción mecánica del sistema. Aunque son utilizados en diversas partes del aerogenerador (multiplicadora, convertidor, generador, sistema hidráulico, cojinetes del rotor y transformador)¹³⁶, uno de los puntos críticos es la caja de engranajes o multiplicadora, donde la fricción de los componentes somete al sistema a una elevada tensión térmica que con el tiempo causa desgaste, acortando la vida útil de las piezas de los componentes y reduciendo el rendimiento. Una parte de las paradas no programadas en parques eólicos está causada por fallos en este punto.

Con el tiempo es casi inevitable la aparición de impurezas como el agua, la suciedad y pequeñas partículas metálicas de los propios componentes (<10 micras) que contaminan los aceites, por lo que para maximizar la vida útil de los componentes, se recomienda un buen mantenimiento del aceite de los engranajes según la norma ISO 4406:2021¹³⁷.

Durante los procesos de mantenimiento, o de desmantelamiento o repotenciación del parque eólico, los aceites usados deben ser manipulados por personal cualificado y maquinaria específica con las pertinentes medidas de seguridad para evitar que se produzcan vertidos y almacenar en recipientes específicos con el fin de evitar fugas o derrames (Figura 37). Aunque por lo general no es posible eliminar todos los fluidos operativos sin dejar ningún residuo, el riesgo resultante de contaminación del suelo se minimiza significativamente¹⁰¹.

Según el artículo 7 del Real Decreto 679/2006, de 2 de junio, por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados¹³⁸, el tratamiento mediante regeneración será prioritario en la gestión de los aceites usados frente a otras formas de reciclado y a la valorización energética, por este orden.



Figura 37. Fuga de aceite en aerogenerador.
Fuente: Laurent Goiffard (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eolienne_Compagnie_du_Vent.JPG)

La regeneración del aceite usado consiste en extraer del aceite todos los residuos que pueda contener, como partículas, cloro, azufre, otros hidrocarburos, metales pesados, etc. Al final del proceso, el aceite regenerado se considera una base lubricante de alta calidad apta para fabricar nuevos aceites lubricantes, entre otros usos. Según datos de los dos Sistemas Colectivos de Responsabilidad Ampliada del Productor (SCRAP) más importantes, se ha regenerado casi el 70 % del total de aceite industrial usado recogido en España¹³⁸.

Los aceites usados también se pueden someter a un reciclado material, siendo válido para producir otros materiales como betún asfáltico, que luego se puede usar para telas impermeabilizantes o asfaltado de carreteras, pinturas, tintas, fertilizantes o arcillas expandidas.

¹³⁵ Zaharia, Sebastian & Morariu, Cristin & Nedelcu, Anisor & Pop, Mihai Alin. (2017). *Experimental Study of Static and Fatigue Behavior of CFRP-Balsa Sandwiches under Three-point Flexural Loading*. BioResources. 12. 2673-2689. 10.15376/biores.12.2.2673-2689. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/317224037_Experimental_Study_of_Static_and_Fatigue_Behavior_of_CFRP-Balsa_Sandwiches_under_Three-point_Flexural_Loading

¹³⁶ <https://globecore.com/publications/wind-turbine-oil-system/>

¹³⁷ ISO 4406:2021 *Hydraulic fluid power - Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles*. ISO Standards. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/79716.html>

¹³⁸ SIGAUS (2021) y SIGPI (2021). Elaboración propia. Disponible en: <https://www.sigaes.es/sigaes-en-cifras> y <http://sigpi.es/>

La valorización energética es la opción para los aceites usados que no pueden ser regenerados y consiste en aprovechar el potencial del residuo, previamente tratado, como combustible de uso industria para generar energía. Puede ser utilizado en centrales térmicas de cogeneración eléctrica, cementeras, pape-leras, hornos, fábricas de materiales de construcción o en otros procesos industriales.

6.2.5 Aparatos Eléctricos y Electrónicos

Por separado, los componentes eléctricos y electrónicos incorporados e integrados en la turbina consti-tuyen alrededor del 1 % de su masa (se estima que las unidades de control de un aerogenerador están for-madas por alrededor de 9.500 piezas electrónicas) y consisten en componentes de señal y potencia, resis-tencias, condensadores y circuitos integrados. El alu-minio, el estaño, el zinc, el tántalo y diversos metales preciosos en cantidad variable se encuentran entre sus principales constituyentes¹⁰¹.

Los aerogeneradores no están incluidos en el ám-bito del Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos⁴³, al ser considerados instalaciones fijas de gran envergadura. Por tanto, no existen obligaciones de productos de organizar y financiar la gestión de estos residuos para los productores, más allá del régimen general de obligaciones marcado en la Ley 7/2022¹³, siendo el productor del residuo la figura que debe asegurar la adecuada gestión de estos residuos.

De acuerdo con el artículo 11 de esta ley, los cos-tes relativos a la gestión de los residuos tendrán que correr a cargo del productor inicial de residuos, del poseedor actual o del anterior poseedor de residuos. Las compañías eléctricas, dueñas de los parques eóli-cos, serán por tanto las responsables de financiar una adecuada gestión de estos residuos, que respete ade-más el orden de prioridades de la jerarquía de residuos en su gestión.

Los principales RAEE resultantes del desmantela-miento de los aerogeneradores que sí están sujetos a la normativa específica son el transformador, que re-presenta aproximadamente la mitad del peso total de los RAEE generados, los conmutadores y el resto de aparataje genérico²⁶.

6.2.6 Tierras raras

Los elementos de tierras raras y el boro son esenciales para los diseños de turbinas que emplean imanes per-manentes. La mayoría de las turbinas de transmisión directa están equipadas con generadores de imanes permanentes, que normalmente contienen neodimio y cantidades más pequeñas de disprosio. En promedio, un imán permanente contiene 28,5 % de neodimio, 4,4 % de disprosio, 1 % de boro y 66 % de hierro, y pesa hasta 4 t¹³⁹.

Las alternativas para la recuperación y reciclaje de estos materiales pasan por la extracción manual o au-tomatizada, la fundición, la disolución y la degradación y desmagnetización en atmósfera de hidrógeno, siendo esta última la tecnología menos contaminante desarro-llada hasta la fecha¹⁰¹.

La Universidad de Birmingham, financiada por el programa europeo Horizonte 2020, desarrolló una cadena de suministro europea para su proceso SUS-MAGPRO¹⁴⁰ “Recuperación, reprocesamiento y reutiliza-ción sostenibles de imanes de tierras raras en una economía circular” para la recuperación de imanes de neodimio, boro y hierro. Está previsto que este proceso recupere tierras raras de residuos, para luego utilizarlas en la creación de nuevos imanes.

6.2.7 Adhesivos y revestimientos superficiales

Los adhesivos son empleados principalmente para unir determinados puntos del laminado de las palas de los aerogeneradores y son de composiciones muy varia-bles (epoxis, poliuretano, etc.). Estas uniones le con-fieren estabilidad estructural a la pala para mantener su diseño y tensiones aerodinámicas.

Es difícil separar efectivamente el adhesivo de los materiales que están uniendo, por lo que el destino de este residuo suele ser el mismo que el del resto de la pala. Se trata de residuos peligrosos y no peligrosos que, en caso de ser recuperados, deben ser gestiona-dos correctamente, siendo la valorización energética el destino habitual en la actualidad.

Los revestimientos superficiales (de polietileno, po-liuretano, etc.), barnices, pinturas o gelcoats protec-tores tienen como función extender la vida útil de los materiales de la pala, especialmente aquellos de mayor exposición al exterior o a las condiciones meteorológi-cas, pero normalmente no son separados y permanecen adheridos a las superficies de los componentes mayori-tarios durante el tratamiento de la pala. ■

¹³⁹ Rabe, Wiebke & Kostka, Genia & Smith Stegen, Karen. (2016) *China's supply of critical raw materials: Risks for Europe's solar and wind industries?* Energy Policy. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/308272027_China's_supply_of_critical_raw_materials_Risks_for_Euro-pe's_solar_and_wind_industries

¹⁴⁰ <https://www.susmagpro.eu/>

7 CONCLUSIONES

La creciente demanda de energía y las obligaciones europeas en materia de energías renovables hacen necesario aumentar la capacidad de producción energética del sistema eólico español. Las primeras generaciones de aerogeneradores instalados en España (actualmente el 36 % del parque eólico) están próximas al final de su vida útil, por lo que cobra gran importancia el desarrollo de acciones o buenas prácticas que permitan extender su ciclo de vida y el fomento de la repotenciación de los parques que se vayan quedando obsoletos. Para los casos en los que esta acción no es posible, resulta crucial aplicar los principios de la economía circular a la hora de gestionar los residuos que se producen durante el desmantelamiento los parques eólicos con el fin de recuperar el mayor número de materiales posible y evitar su depósito en vertedero.

Teniendo en cuenta estas premisas, se ha desarrollado el presente estudio a modo de guía de buenas prácticas, tratamientos y proyectos que se están llevando a cabo en la actualidad sobre la gestión de los distintos componentes y materiales de los aerogeneradores (e infraestructuras e instalaciones asociadas) cuando estos llegan al final de su vida útil. El elemento diferenciador es el enfoque integrado desde el punto de vista de la gestión del parque eólico al completo y la distinción entre las buenas prácticas relativas a su fin de vida y las relacionadas con el tratamiento específico de sus componentes y materiales.

En el caso de buenas prácticas para el fin de vida útil del parque eólico, se hace necesario priorizar todas las acciones que conlleven la menor producción de residuos posible, sin que esto repercuta en un incremento excesivo del gasto para los propietarios de los parques. Teniendo en cuenta esto, la actividad más idónea sería la repotenciación de los parques eólicos obsoletos, lo que permitirá aumentar la producción de electricidad, ya que se sustituyen los aerogeneradores localizados en las zonas históricamente con mejor recurso eólico por otros más modernos de nueva generación, reduciendo así su número y la extensión necesaria para los parques.

En cuanto a las buenas prácticas asociadas a la gestión de los materiales compuestos que componen un aerogenerador, los tratamientos mecánicos (corte, triturado, etc.) son una opción muy versátil y económica a la hora de tratar los residuos para reducir el tamaño de los componentes, lo que permite abaratar enormemente los costes de transporte. Sin embargo, no es una opción recomendable a la hora de tratar posteriormente los residuos, puesto que aumenta la dificultad para separar los distintos materiales triturados. Por este motivo, la mayoría de los estudios de este campo están enfocados en mejorar el afino durante o tras los procesos de reducción de tamaño. Muchos de ellos emplean el material mixto recuperado como elemento a incorporar en la producción de cemento o en mezclas asfálticas para su uso en carreteras y caminos.

Los tratamientos térmicos son capaces de separar las fases del material compuesto y recuperar las fibras de vidrio o carbono, pero con una calidad inferior a la de partida y a costa de consumir grandes cantidades de energía para alcanzar las temperaturas de operación de los procesos. Aunque la mayoría de los procesos de reciclaje térmico están en fase de investigación o desarrollo, hay empresas que están desarrollando la escalabilidad de estas tecnologías a nivel industrial para el sector eólico.

En el reciclaje químico se emplean procesos que descomponen la fase matricial en elementos más simples para separarlos del material estructurante. Se trata de tecnologías menos instauradas a nivel industrial en el mercado, dada su elevada complejidad y coste, el estado de desarrollo del arte y las limitaciones técnicas para llevarlo a cabo a gran escala. Hoy en día es utilizado fundamentalmente de forma complementaria al reciclaje mecánico.

Por último, la valorización energética de los materiales constituyentes de las palas eólicas o la reutilización de las propias palas como material estructural son prácticas que, aunque actualmente se están llevando a cabo, no suponen una solución sostenible en el tiempo para el elevado volumen de residuos que se prevé generar. En el primer caso, los residuos de las palas no son un buen combustible dado su bajo poder calorífico y composición, pudiendo llegar incluso a dañar los hornos. La utilización de las palas como material estructural es una técnica que está limitada a ciertos casos y necesidades bastante concretas.

El reciclaje o recuperación del resto de compuestos que conforman los aerogeneradores y las instalaciones del parque eólico (acero, hormigón, RAEE, aceites, etc.) no presenta tanta complejidad como la del material compuesto de las palas, ya sea porque disponen de procesos de gestión y tratamiento bien definidos, o bien porque, en comparación, no se generan cantidades tan elevadas. ■



Guía para el desarrollo de criterios ambientales a tener en cuenta en el desmantelamiento y repotenciación de instalaciones de generación de energía eólica

ANEXO I

MATERIAS PRIMAS FUNDAMENTALES EN LOS AEROGENERADORES

Materia Prima Fundamental	Utilización	Uso (s)	Lugar de Origen	Importancia	Comentarios / Observaciones
Berilio	Componentes del aerogenerador	Sistemas electrónicos y de comunicaciones (digitalización y monitorización)	EEUU, China	CRÍTICA	
Borato	Componentes del aerogenerador	Fabricación de imanes permanentes	Turquía, EEUU, Argentina, Chile, Perú, Rusia	CRÍTICA	
Cobalto	Componentes del aerogenerador	Fabricación de baterías	República Democrática del Congo	CRÍTICA	
Carbón de Coque	Componentes del aerogenerador	Acero para elementos estructurales e instalaciones y fibra de carbono	Japón, EEUU, Corea del Sur, Polonia	ALTA	
Espato de Flúor	Componentes del aerogenerador	Acero para elementos estructurales e instalaciones y obtención de aluminio	China, México	CRÍTICA	
Tierras Raras Pesadas	Aerogenerador	Fabricación de imanes para aerogeneradores del tipo "Direct Drive"	China	CRÍTICA	Pertenece a este grupo el disprosio
Tierras Raras Ligeras	Aerogenerador	Fabricación de imanes para aerogeneradores del tipo "Direct Drive"	China	CRÍTICA	Pertenecen a este grupo el neodimio y el praseodimio
Magnesio	Componentes del aerogenerador	Obtención del acero y para aleaciones ligeras utilizadas para aplicaciones de electrónica	China, Malasia, EEUU	CRÍTICA	
Grafito Natural	Componentes del aerogenerador	Desarrollo de baterías y obtención del acero	China, Turquía, Brasil	CRÍTICA	
Materiales del Grupo de Platino	Componentes del aerogenerador	Aplicaciones de electrónica	Sudáfrica	ALTA	
Silicio Metálico	Aerogenerador	El silicio se utiliza como aditivo para la producción de acero eléctrico de grano orientado y laminado en frío, el cual se utiliza en la fabricación de núcleos magnéticos necesarios para la fabricación de los transformadores eléctricos instalados en los aerogeneradores y subestaciones eléctricas para mejorar las prestaciones eléctricas.	Rusia, Japón, China, Corea, Polonia	CRÍTICA	Número de fabricantes reducido, aranceles existentes en la UE para los fabricantes asiáticos por problemas de competencia. Tendencia a usar aceros de mejor calidad (láser de Japón, Corea) para cumplir requisitos de nuevas directivas.



Materia Prima Fundamental	Utilización	Uso (s)	Lugar de Origen	Importancia	Comentarios / Observaciones
Tantalio	Componentes del aerogenerador	Aplicaciones de electrónica	Brasil, Australia, Ruanda, República Democrática del Congo	ALTA	
Niobio	Componentes del aerogenerador	Aleaciones de acero	Brasil, Canadá, Nigeria	CRÍTICA	
Bauxita	Aerogenerador	Producción de Al para compontes del aerogenerador e instalaciones eléctricas (Cables, celdas de MT, trafos, etc.)	Guinea, Australia, Vietnam, Jamaica	ALTA	
Litio	Aerogenerador	Aplicaciones para almacenamiento de electricidad y obtención de acero y aluminio	Chile, Argentina, China	ALTA	
Fibra de Vidrio	Aerogenerador	Materia prima fundamental para la fabricación de palas de aerogeneradores	China, Marruecos, Turquía, Egipto	CRÍTICA	Los aranceles introducidos recientemente en la UE para las importaciones de fibra de vidrio procedente de China y Egipto, suponen un encarecimiento en la producción de las palas. Esto afecta a la competitividad de las fábricas de palas españolas y pone en riesgo su deslocalización.
Fibra de Carbono	Aerogenerador	Materia prima fundamental para la fabricación de palas de aerogeneradores	Diferentes países en Asia y Europa	CRÍTICA	
Madera de balsa (Balsa Wood)	Aerogenerador	Utilizada en la fabricación de palas de aerogeneradores	Ecuador y Nueva Guinea	CRÍTICA	Producción de este compuesto en otros países de América Central y del Sur y África, pero en pequeñas cantidades.
Large forged rings for Blade Bearings	Aerogenerador	Utilizados en la fabricación de rodamientos metálicos y cojinetes instalados en los aerogeneradores	China e India	ALTA	
Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)	Aerogenerador	Utilizado para la fabricación de diferentes componentes eléctricos y electrónicos de un aerogenerador	Diferentes países en Asia y Europa	CRÍTICA	Recientemente se ha producido un significativo aumento de la demanda, por el crecimiento del vehículo eléctrico.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO