ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SECTOR EÓLICO

PALAS DE AEROGENERADORES

DICIEMBRE 2022

INFORME ELABORADO POR LA ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA

AEE
Asociación Empresarial Eólica
www.aeeolica.org

Este documento ha sido elaborado por la **Asociación Empresarial Eólica**.

Datos de contacto

AEE

C/ Sor Ángela de la Cruz, 2 – 14º - 28020 Madrid
www.aeeolica.org
aeeolica@aeeolica.org

Control de Versiones

Versión	Motivo/ Cambio	Fecha
V1	Primer documento	12/2021
V2	Actualización de datos y revisión de la información.	12/2022

CONTENIDO

1. Introducción 4

1.1. Componentes de un aerogenerador 5

1.2. Antecedentes y situación actual 6

1.3. Estimación del volumen de residuos a gestionar 10

1.4. Excedentes de fabricación 12

2. Estructura y Materiales de las palas eólicas 13

2.1. Fase Dispersa: Fibras 14

2.2. Matriz 15

2.3. Madera de balsa y otros materiales 16

3. Regulación 17

3.1. Marco Europeo 18

3.2. Marco Nacional 20

3.2.1. Estrategia y Planes de Acción de Economía Circular 20

3.2.2. PERTE EHRA y de Economía Circular 20

3.2.3. Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular 21

3.3. Marco Autonómico 22

4. Posibles Soluciones 23

4.1. Prevención de Residuos 24

4.1.1. Proyectos relacionados con la prevención de residuos 25

4.1.2. I+D+i. Estudio de Patentes sobre prevención de residuos 30

4.2. Reutilización de las palas dentro del sector eólico 32

4.2.1. Evaluación Técnica de Extensión de Vida 32

4.2.2. Mercado de aerogeneradores de segunda mano 33

4.3. Reutilización en usos distintos 34

4.4. Reciclaje de los Materiales 36

4.4.1. Reciclaje Mecánico 37

4.4.2. Reciclaje Térmico 41

4.4.3. Reciclaje Químico 46

4.5. Recuperación de Energía 48

4.6. Nuevas plantas de procesamiento de residuos eólicos *48*

5. Conclusiones y Próximos Pasos **49**

6. Bibliografía **51**

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el sector eólico español ha mantenido su trayectoria ascendente en cuanto a la instalación de nueva potencia y a la participación en el mix de generación. Si en 2020 la eólica representaba la tecnología con mayor potencia instalada, en 2021 se convirtió en la principal tecnología del mix energético español, generando más del 23% de la electricidad consumida en España y superando así a la nuclear. De cara a los próximos años, tal como establece el Plan Nacional de Energía y Clima (PNIEC), la eólica continuará su crecimiento con el objetivo de alcanzar una potencia instalada de 50 GW en 2030, frente a los 29 GW de la actualidad (datos de 2022).

Al mismo tiempo, la primera generación de aerogeneradores está llegando al final de su vida operativa. Unos 7.500 aerogeneradores (un 35% de la flota instalada) superarán en 2022 los 20 años de vida útil. Esto significa que, en los próximos años, muchos parques eólicos deberán optar entre extender la vida de sus activos o llevar a cabo una repotenciación para sustituir los aerogeneradores antiguos por otros más modernos (Figura 1). La elección entre una estrategia u otra (extensión de vida vs repotenciación) dependerá de múltiples factores que afectan al modelo de negocio de las instalaciones existentes, cómo, por ejemplo, el estado de las máquinas, la fiscalidad aplicable, el fin del régimen de incentivos o el desarrollo de mecanismos de apoyo específicos para repotenciación.

Figura 1: Desmantelamiento de los parques eólicos de Zas y Corme (Fuente: Surus Inversa).

En la mayoría de los casos, los aerogeneradores que alcanzan los 20 años de vida útil todavía se encuentran en buenas condiciones, por lo que la tendencia generalizada en el sector está siendo la de extender su vida útil hasta los 25 o 30 años de operación. Sin embargo, esta tendencia no podrá extenderse indefinidamente y llegará un momento en el que los parques más antiguos tendrán que ser desmantelados. Además, las líneas de ayuda para repotenciación de parques eólicos anunciadas recientemente, vinculadas

al Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), previsiblemente acelerarán el ritmo de repotenciación.

En conclusión, se prevé que en los próximos años el sector eólico deberá gestionar el desmantelamiento de un número significativo de aerogeneradores y, en consecuencia, de palas eólicas, para las que se deberá buscar soluciones de reutilización o reciclaje.

Por ello, en junio de 2021 la industria eólica española y europea se comprometieron a que para el año 2025 se podrá reutilizar, reciclar o recuperar el 100% de las palas desmanteladas, evitando de esta manera su retirada a vertedero [1]. Al mismo tiempo, el sector eólico se comprometió a no enviar las palas desmanteladas en Europa a otros países fuera de Europa para su vertido.

En este documento se expone el estado del arte sobre las prácticas de economía circular en torno a las palas del aerogenerador, identificando diferentes soluciones y tecnologías que deben desarrollarse en el corto plazo, para que en 2025 el objetivo de circularidad sea una realidad.

1.1. COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR

Actualmente es viable reciclar o reutilizar entre el 85 y el 90% del peso de un aerogenerador [2]. La mayoría de los grandes componentes (e.g. cimentación, torre y góndola) disponen de procesos para su reciclaje o reutilización al estar fabricados a partir de materiales como el acero, el cobre, el aluminio o el hormigón. Además, constituye una práctica habitual del sector el aprovechamiento de muchos de los componentes como piezas de repuesto.

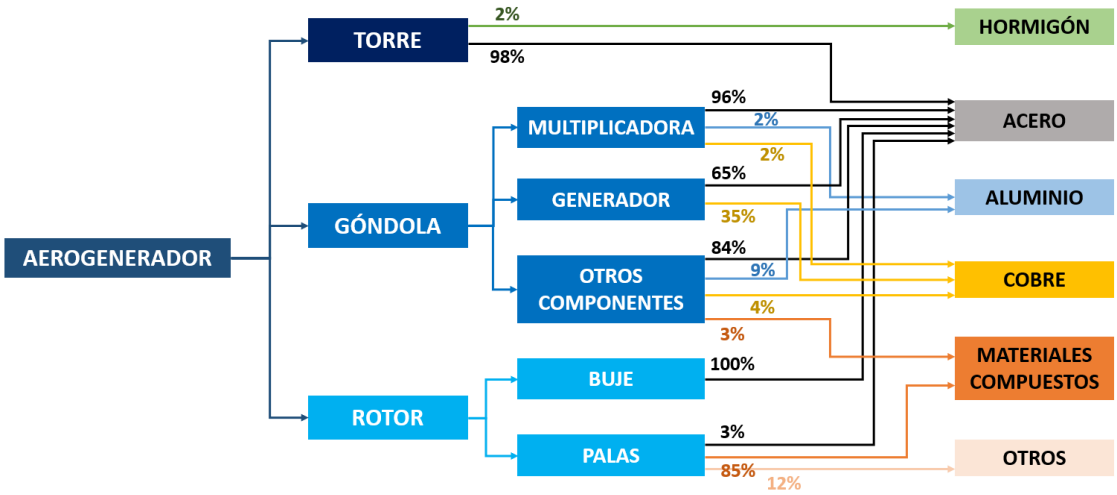


Figura 2: Desglose de los componentes presentes en un aerogenerador terrestre en sus materiales, con la composición en porcentaje de peso (Fuente datos: [3] [4] [5]. Elaborado por AEE).

La composición de los elementos de un aerogenerador se muestra de forma simplificada en la Figura 2. Se observa como el principal material utilizado para la construcción de un aerogenerador es el acero/ fundiciones de hierro (utilizados en torre, componentes del tren de potencia, etc.), que suponen el 82-85% del peso total del aerogenerador, seguido de los materiales compuestos (utilizados en palas y góndola), que representan el 11-16% [3], los cuales presentan el mayor reto para su reciclaje.

Los materiales compuestos son una combinación de fibras reforzadas (vidrio o carbono) con una matriz a base de resinas poliméricas que han permitido mejorar el rendimiento de los aerogeneradores al posibilitar la fabricación de palas más largas y ligeras, con formas aerodinámicas optimizadas. Sin embargo, este tipo de materiales utilizados en la fabricación de las palas son difíciles de separar y, por lo tanto, complicados de reciclar.

En cualquier caso, es necesario tener en cuenta que el impacto de los residuos procedentes de las palas de aerogeneradores antiguos no supone ningún riesgo medioambiental. Comparativamente con otro tipo de residuos industriales o incluso con productos que utilizamos en la vida cotidiana, las palas de los aerogeneradores tienen un impacto muy reducido. Por ejemplo:

- El peso de todas las palas a reciclar durante un año representa únicamente el 1,4% del peso total de los envases de plástico no reciclados en España.
- Las palas de aerogeneradores desmanteladas no son tóxicas y no producen lixiviados ni emisiones que puedan ser perjudiciales para el medioambiente, como si ocurre con muchos otros productos que se desechan a vertedero y acaban generando contaminación de terrenos, acuíferos y aguas subterráneas.

No obstante, las palas de los aerogeneradores son residuos muy voluminosos cuya gestión todavía no está totalmente resuelta a nivel comercial. Por ello, la implementación de medidas de economía circular constituye una prioridad para el sector eólico, con el objetivo de reducir su huella ecológica e impulsar su sostenibilidad.

1.2. ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL

A cierre de 2021, en España había **1.298 parques eólicos** repartidos en más de 800 municipios, que contaban con **21.574 aerogeneradores** y **64.722 palas instalados.**

De esos aerogeneradores, un **72%** (unos 15.589) se instalaron antes de 2007 (incluido) y, por lo tanto, tienen 15 años o más; y un **35%** (unos 7.482) fueron instalados antes de 2002, y superan los 20 años de vida útil. Esto supone que en los próximos años un número importante de palas deberán ser desmanteladas (Figura 3).

Es importante considerar, además, que la instalación de los primeros parques eólicos no se realizó de una manera uniforme en todo el territorio, siendo Galicia, Navarra y Aragón

las Comunidades Autónomas que disponen de un mayor número de parques eólicos con más de 20 años (Tabla 1).

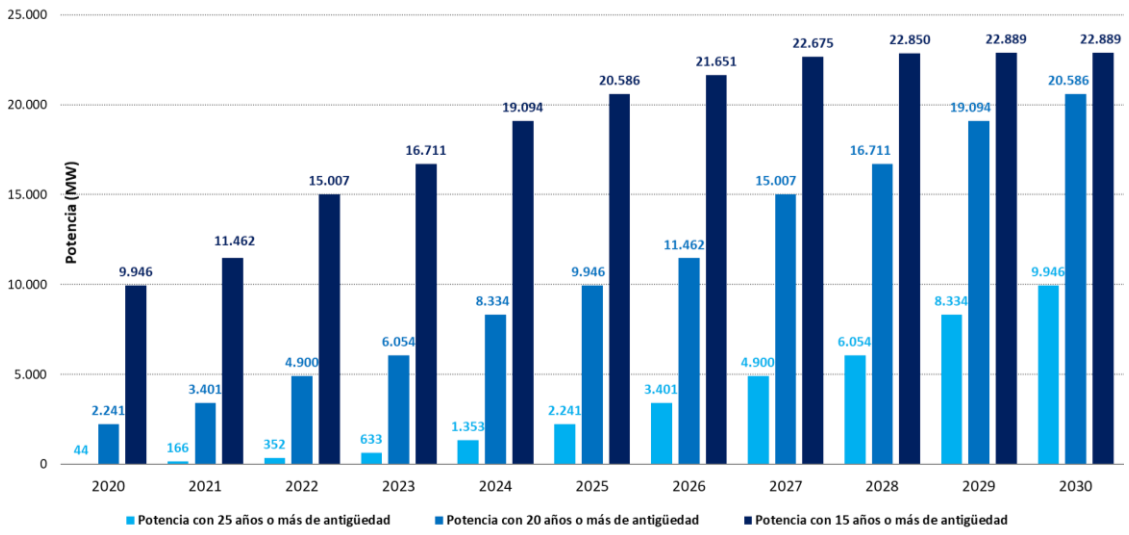


Figura 3: Antigüedad de la flota de parques eólicos en España (Fuente: AEE).

Tabla 1: Distribución de la potencia instalada por Comunidades Autónomas hasta 2002 y hasta 2022 (Fuente: AEE).

	Hasta 31/12/2001			Hasta 31/12/2021		
CCAA	POTENCIA (MW)	PPEE	AEROS	POTENCIA (MW)	PPEE	AEROS
Galicia	988,55	46	1.650	3.866,64	182	4.002
Navarra	565,12	25	859	1.302,80	58	1.287
Aragón	553,71	28	820	4.435,43	176	2.804
Castilla La Mancha	477,01	15	696	3.954,84	151	3.138
Castilla y León	373,16	29	668	6.403,00	272	4.716
Canarias	111,62	37	320	557,82	100	585
Andalucía	94,25	14	240	3.521,95	163	2.117
Cataluña	83,51	5	190	1.271,20	47	811
La Rioja	73,92	2	112	446,62	14	400
País Vasco	26,97	2	40	153,25	7	153
Asturias	24,42	1	37	645,45	25	520
Comunidad Valenciana	17,09	2	20	1.238,78	39	798
Murcia	11,22	2	17	261,96	14	186
Extremadura	0,00	0	0	39,38	1	15
Cantabria	0,00	0	0	35,30	3	39
Baleares	0,00	0	0	3,68	46	4
Total	**3.400,55**	**208**	**5.668**	**28.138,07**	**1.298**	**21.574**

Cuando los parques eólicos se aproximan al final de su vida útil de diseño (20 años), los propietarios deben optar por una de las siguientes alternativas:

- Desmantelar el parque.
- Extender su vida operativa más allá de los 20 años de diseño.
- Repotenciar, sustituyendo los aerogeneradores antiguos por otros nuevos, más eficientes y de mayor potencia unitaria.

Hasta el momento**, la tendencia natural del mercado español es optar por la extensión de vida más allá de los veinte años inicialmente previstos**. El hecho de que, en la mayoría de los casos los activos existentes se encuentren próximos a su amortización y que las inversiones requeridas para extender la vida útil sean reducidas, hacen que la extensión de vida sea la alternativa de menor riesgo económico para el promotor. Si además tenemos en cuenta las elevadas inversiones requeridas para la repotenciación, equivalentes prácticamente al 100% de la inversión necesaria para un parque eólico nuevo, junto con el lucro cesante que implica la parada de generación durante el desmantelamiento y la posterior instalación del nuevo parque, así como los costes de oportunidad que suponen la pérdida de ingresos del parque antiguo, convierten a la repotenciación en una alternativa meramente testimonial hasta el momento.

Por este motivo, a pesar de la antigüedad del parque eólico español, a fecha de 31 diciembre 2021 en España sólo se habían repotenciado 11 parques eólicos, detallados en la Tabla 2.

Tabla 2: Lista de parques eólicos repotenciados en España.

Nombre Parque Eólico	Localización	Año Instalación Original	Año Repotenciación	Potencia Original (MW)	Potencia Repotenciación (MW)	NºAeros Original	Nº Aeros Final
Los Valles	Lanzarote, Islas Canarias	1991	2007	5,28	7,65	48	9
PESUR	Tarifa, Cádiz,Andalucia	1992	2008	20	42	184	21
EEE	Tarifa, Cádiz,Andalucia	1992	2009	10,23	32	66	16
Juan Adalid	Tenerife, Islas Canarias	1995	2012	1,26	1,6	7	2
Fuencaliente	Tenerife, Islas Canarias	1996	2012	1,5	2,25	5	3
Carretera de Arinaga (*)	Islas Canarias	2002	2012	6,18	6,92	11	9
Cabo Vilano	A Coruña, Galicia	1991	2016	3,9	6	22	2
Malpica	A Coruña, Galicia	1997	2017	16,5	16,5	69	7
El Cabrito	Tarifa, Cádiz,Andalucia	1995	2018	30	30	90	12
Zas	A Coruña, Galicia	1998	2019	24	24	80	10
Corme	A Coruña, Galicia	2000	2021	18,3	18,3	61	7

(*) Se sustituyeron 3 aerogeneradores originales por una máquina nueva.

Las repotenciaciones, además de reducir significativamente el número de máquinas instaladas en parque, disminuyendo así su huella ambiental, permiten aumentar la energía generada (a igualdad de potencia instalada) y cumplir con los nuevos requisitos de conexión a la red eléctrica.

Así, por ejemplo, con la repotenciación del parque eólico *Malpica* se logró doblar la electricidad obtenida, reduciendo la superficie ocupada de 3,2 a 1,9 hectáreas; y en el parque eólico de *El Cabrito* se incrementó la producción un 16% por la mayor eficiencia y disponibilidad de los nuevos equipos.

Los aerogeneradores desmantelados en estas repotenciaciones se han destinado principalmente a mercados de segunda mano. Tal como se desarrolla en apartados posteriores, algunas empresas españolas están contribuyendo a generar este tipo de mercados a escala global mediante subastas específicas, lo que permite a los

promotores la venta de sus activos eólicos desmantelados, ya sea para su reinstalación en otras ubicaciones o para su aprovechamiento como repuestos.

Es decir, las palas procedentes de parques eólicos repotenciados hasta la fecha en España no han tenido que ser trasladadas a vertedero, sino que han podido ser absorbidas por estos mercados de segunda mano.

Sin embargo, es muy probable que esta situación no pueda mantenerse a medio plazo. Una vez se dinamice la repotenciación de parques eólicos, los mercados de segunda mano presumiblemente no tendrán capacidad suficiente para gestionar el elevado volumen de palas que provenga del desmantelamiento de los parques antiguos.

Además, las tecnologías disponibles para el reciclaje de las palas eólicas todavía no se encuentran plenamente desarrolladas a escala comercial, por lo que tampoco constituyen una alternativa viable para reciclar las cantidades previstas para los próximos años.

De esta manera, entre los retos identificados por las empresas del sector eólico se encuentran las siguientes:

- Las tecnologías de reciclaje de materiales compuestos deben seguir evolucionando para ser más eficientes en costes y obtener productos de mejor calidad.
- En España todavía no existen plantas industriales con capacidad suficiente para el tratamiento de volúmenes significativos de materiales compuestos, más allá de proyectos piloto experimentales.
- El resto de la cadena de valor tampoco está lo suficientemente desarrollada, pues no existen agentes con experiencia y capacidad para gestionar a escala comercial el volumen de residuos que previsiblemente se generará por el desmantelamiento de palas y que lo transforme en un nuevo producto (reciclado y reutilización).
- Se requieren elevadas inversiones para garantizar una gestión sostenible de los residuos durante todo el proceso, como, por ejemplo, para la habilitación de espacios de almacenamiento adecuados que permitan mantener el buen estado de la fibra (seca y limpia) hasta su posterior tratamiento y recuperación.
- Se tienen que desarrollar nuevos mercados para los productos resultantes del reciclado de los materiales compuestos, que frecuentemente poseen propiedades mecánicas diferentes a las fibras de vidrio o de carbono vírgenes.
- Avanzar en la reducción o eliminación del uso de aquellos tipos de resinas que presentan mayor dificultad para su tratamiento de fin de vida.

Por todo ello, para aquellas palas ya instaladas y que van a ser desmanteladas en los próximos años, **desde el sector eólico se considera fundamental impulsar las actividades de I+D+i para mejorar los usos en cascada y las tecnologías de reciclaje de materiales compuestos, así como impulsar las inversiones para el desarrollo del mercado y de las capacidades industriales necesarias**.

En el apartado 4 de este documento se describen con más detalle las diferentes soluciones disponibles en la actualidad para conseguir una economía circular de las palas.

Figura 4: La eólica lleva en su ADN el cuidado del medioambiente e intenta ser escrupulosa con su impacto medioambiental (Autor: A. Pentinat).

1.3. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE RESIDUOS A GESTIONAR

Realizando un análisis detallado y teniendo en cuenta los tamaños y pesos de los diferentes modelos de palas instalados en España, se calcula que a finales de 2021 había aproximadamente **290.500 toneladas** de palas en operación. De este total:

- En 2023, 34.600 toneladas tendrán más de 20 años de vida (12% del total) y 4.500 toneladas tendrán un mínimo de 25 años (2%);
- Para 2030, las palas que hayan estado más de 20 años en operación representarán 173.000 toneladas (47%), y 79.500 toneladas de esas lo habrán estado al menos durante 25 años (21%).

En la Tabla 3 se muestra la evolución de la antigüedad de las palas en un escenario teórico en el que no se realizasen repotenciaciones y sin considerar la instalación de nueva potencia.

Tabla 3: Evolución Antigüedad Palas en un Escenario SIN repotenciación (toneladas de palas)

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<15 Años	142.870	117.302	101.052	90.374	77.984	76.143	75.774	75.774
15 Años	16.348	25.568	16.250	10.679	12.389	1.842	369	0
16 Años	36.421	16.348	25.568	16.250	10.679	12.389	1.842	369
17 Años	15.372	36.421	16.348	25.568	16.250	10.679	12.389	1.842
18 Años	16.168	15.372	36.421	16.348	25.568	16.250	10.679	12.389
19 Años	19.649	16.168	15.372	36.421	16.348	25.568	16.250	10.679
20 Años	8.969	19.649	16.168	15.372	36.421	16.348	25.568	16.250
>20 Años	34.637	43.607	63.255	79.423	94.795	131.216	147.564	173.132
TOTAL	290.434	290.434	290.434	290.434	290.434	290.434	290.434	290.434

El escenario planteado en el análisis anterior se verá modificado por la repotenciación de los parques eólicos más antiguos. Estas instalaciones se encuentran en los emplazamientos con mejor recurso eólico, utilizando, sin embargo, tecnología obsoleta que no permite optimizar la producción eléctrica de los aerogeneradores. Por ello, estas máquinas más antiguas serán reemplazadas por otras más modernas.

Analizando la distribución anual de instalación de palas de aerogeneradores en España, y teniendo en cuenta que la industria del reciclaje requiere de un volumen relativamente constante para ser rentable, se puede prever una media de **20.000 toneladas de palas a tratar cada año**. Sin embargo, hasta llegar a este volumen anual objetivo, los diversos proyectos que se están desarrollando deben ponerse en servicio, lo que se llevará a cabo a lo largo del próximo lustro.

En la Tabla 4 se muestra la evolución de la antigüedad de las palas en un escenario en el cual se recurra a la repotenciación de los parques más antiguos, ligado a la obligación de reciclar las palas eólicas, siendo este el escenario esperable para los próximos años.

Tabla 4: Evolución Antigüedad Palas en un Escenario CON Reciclaje (toneladas de palas).

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<15 Años	142.870	117.302	101.052	90.374	77.984	76.143	75.774	75.774
15 Años	16.348	25.568	16.250	10.679	12.389	1.842	369	0
16 Años	36.421	16.348	25.568	16.250	10.679	12.389	1.842	369
17 Años	15.372	36.421	16.348	25.568	16.250	10.679	12.389	1.842
18 Años	16.168	15.372	36.421	16.348	25.568	16.250	10.679	12.389
19 Años	19.649	16.168	15.372	36.421	16.348	25.568	16.250	10.679
20 Años	8.969	19.649	16.168	15.372	36.421	16.348	25.568	16.250
>20 Años	34.637	35.607	45.255	49.423	48.795	65.216	61.564	67.132
Reciclado	**8.000**	**10.000**	**12.000**	**16.000**	**20.000**	**20.000**	**20.000**	**20.000**
TOTAL	290.434	282.434	272.434	260.434	244.434	224.434	204.434	184.434

1.4. EXCEDENTES DE FABRICACIÓN

Al análisis anterior habría que añadir los residuos de materiales compuestos procedentes del propio proceso de fabricación de palas.

En España existen varias fábricas de palas que generan residuos de materiales compuestos, principalmente fibra de vidrio, debido a los recortes de material, los rollos de tela y las palas *scrap* (no conformes). Estos excedentes de fabricación están motivados por varios factores:

- El propio diseño de la pala, con geometrías complejas, que obliga a recortar la materia prima.
- Los suministros de fibra, que se realizan en rollos de dimensiones estándar.
- Los exigentes requisitos de control de calidad de los procesos de fabricación.

Figura 5: Fabrica de palas de Acciona en Lumbier (Fuente: Diario de Navarra).

Es decir, los procesos de fabricación de palas generan un volumen de residuos difícil de cuantificar, pero que suponen un suministro continuo de materiales compuestos que también deben ser reciclados de manera eficiente.

2. ESTRUCTURA Y MATERIALES DE LAS PALAS EÓLICAS

Una pala eólica se puede dividir en la parte del núcleo (estructura central resistente) y la sección aerodinámica (Figura 6).

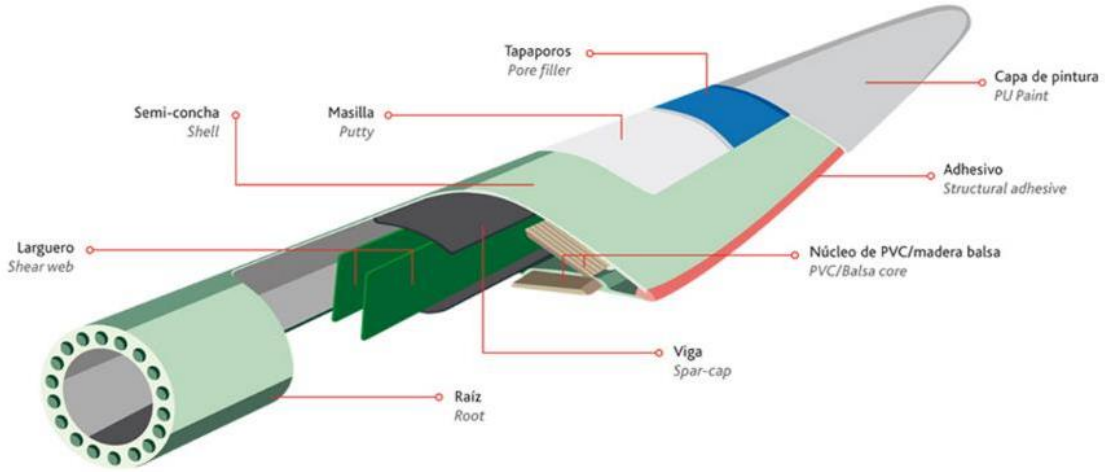


Figura 6: Componentes principales de una pala (Fuente: Acciona).

Las palas son fabricadas principalmente a partir de materiales compuestos, los cuales pueden tener diferentes propiedades que permiten optimizar el diseño de los aerogeneradores mediante la fabricación de palas livianas y de gran longitud, y con una forma aerodinámica perfeccionada. Este tipo de materiales ha permitido aumentar progresivamente el tamaño de los aerogeneradores y extender su uso a los parques eólicos marinos, donde las dimensiones de las máquinas conseguidas son todavía mayores.

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. Comparados con la mayor parte de los metales y sus aleaciones, tienen propiedades mecánicas superiores, como una mayor resistencia y menor peso, por lo que son utilizados en numerosas aplicaciones estructurales en diversos sectores.

Los materiales compuestos tienen dos fases, mostradas en la Figura 7, aunque se pueden añadir también aditivos que mejoren determinadas propiedades del material:

- **Fase Matricial.** Fase principal, la cual posee un carácter continuo y generalmente está constituida por resinas. La matriz suele ser más dúctil y actúa como soporte y protección contra agentes externos de la fase dispersa. Una de las funciones de la matriz es la de transmitir los esfuerzos hasta la fibra, lo que requiere una adhesión total entre ambas fases.

- **Fase Dispersa.** Fase de refuerzo, la cual aporta al material compuesto las propiedades mecánicas resistentes y determina su rigidez. Esta fase la forman las fibras o partículas que están embebidas en la matriz, las cuales pueden ser un metal, un material cerámico o un polímero. La longitud de las fibras determina habitualmente las propiedades mecánicas del material.

Figura 7: Materiales Compuestos (Adaptado de CompositesLab, 2020).

2.1. FASE DISPERSA: FIBRAS

En las palas eólicas, la fase dispersa la constituyen fibras habitualmente de vidrio, pero también de carbono, que están alineadas en la dirección de la carga principal para proporcionar mayor rigidez y resistencia.

Las palas de los aerogeneradores generalmente se fabrican con **Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio** (PRFV, o GFRP por sus siglas en inglés - *Glass Fiber Reinforced Plastic*) debido a su alta disponibilidad y a la madurez de su proceso de fabricación. La fibra de vidrio tiene como principales beneficios su bajo coste, su alta estabilidad térmica y elevado punto de fusión, su no inflamabilidad y su excelente comportamiento en ambientes corrosivos. No obstante, su principal desventaja es la carencia de métodos de reciclaje maduros, que permitan la recuperación y reciclaje del material de forma económica.

A medida que las palas van aumentando su longitud, su peso incrementa exponencialmente, por lo que se ha comenzado a sustituir los PRFV por **Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono** (PRFC o CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer) para las aplicaciones de mayor tamaño. Ésta se considera como una alternativa muy prometedora a la fibra de vidrio al proporcionar mayor rigidez, poseer una menor densidad, y estar las tecnologías de reciclaje para las fibras de carbono generalmente más desarrolladas y con una mayor viabilidad económica. Sin embargo, los PRFC también cuentan con varias desventajas, entre las que se incluye su baja tolerancia a los daños, su conductividad eléctrica, que les hace más ser más propenso a la caída de rayos, y su mayor coste [6].

2.2. MATRIZ

Como matriz de los materiales compuestos se utilizan principalmente resinas termoestables (epoxis, poliésteres y ésteres de vinilo) y resinas termoplásticas.

Las **resinas termoestables** son aquellas que, al someterlas a calor, luz o un agente químico, se convierten en un material no fusible e insoluble. La ventaja de utilizar este tipo de resinas es su menor viscosidad y la posibilidad de curar a bajas temperaturas o, incluso, a temperatura ambiente. Este tipo de materiales se adaptan mejor a cualquier proceso de transformación, razón por la cual son utilizados para la fabricación de palas. Sin embargo, presentan más dificultades para su reciclado.

Las **resinas termoplásticas** a altas temperaturas pueden ser fundidas permitiendo su moldeado, mientras que se endurecen a bajas temperaturas. Tienen como ventaja principal su mayor reciclabilidad. No obstante, en su proceso de fabricación se requiere de un mayor consumo energético para alcanzar las temperaturas requeridas, y las elevadas temperaturas de curado suponen que se corra el riesgo de afectar las propiedades de las fibras. Además, aumenta la dificultad de fabricar piezas de gran tamaño debido a su mayor viscosidad. Estos factores dificultan la utilización de resinas termoplásticas para la fabricación de palas.

Por lo tanto**, las palas son generalmente fabricadas a partir de materiales compuestos PRFV con resinas termoestables**.

Figura 8: Las palas son generalmente fabricadas a partir de materiales compuestos PRFV con resinas termoestables (Autor: R. Andrés).

2.3. MADERA DE BALSA Y OTROS MATERIALES

Además de los materiales compuestos y las resinas, una pala eólica contiene otros materiales en menores proporciones, como, por ejemplo, el PVC, los *gelcoats*, la madera de balsa, poliuretanos y revestimientos superficiales, en función del fabricante.

La **madera de balsa** es un material ligero, adaptable y con buenas cualidades mecánicas, lo que supone que sea demandada para múltiples aplicaciones como pueden ser las palas de los aerogeneradores, automóviles y embarcaciones. Se trata de un árbol originario exclusivamente de Ecuador, Indonesia y Papúa Nueva Guinea que tiene un crecimiento rápido y es sencillo de cultivar, lo que hace que pueda ser cultivado de manera sostenible.

La madera de balsa utilizada en la fabricación de palas en España procede de plantaciones que cuentan con la certificación FSC (Forest Stewardship Council) y están sujetas a los estrictos requisitos de la cadena de suministro de las empresas en materia de sostenibilidad. Es decir, la madera de balsa utilizada en las palas proviene de plantaciones sostenibles con una política de reforestación sólida y certificada.

FSC
www.fsc.org
FSC® A000507
The mark of responsible forestry

Figura 9: Certificación de Gestión Forestal de FSC, utilizada por los fabricantes de palas para conocer el origen de la madera de balsa (Fuente: FSC).

La aplicación de los estándares FSC asegura que las plantaciones deben respetar una serie de indicadores sociales, incluyendo el bienestar social y económico a largo plazo de los trabajadores del bosque y de las comunidades locales, el respeto por las comunidades indígenas, el cumplimiento de los derechos de los trabajadores y la aplicación de unas condiciones laborales seguras. Asimismo, estas certificaciones aseguran que se han minimizado los impactos medioambientales negativos, al no permitirse la tala ilegal o la reconversión de bosques naturales para este tipo de explotaciones. De esta manera, la certificación FSC permite asegurar el origen de la madera de balsa utilizada (Figura 9).

No obstante, la madera de balsa está cayendo en desuso y está siendo sustituida por plásticos PET y PVC[1].

[1] Para más información sobre la madera de balsa y su utilización puede consultar el documento publicado por AEE (2021), *La fabricación de las palas de los aerogeneradores y el uso de la madera de balsa en su fabricación*. Recuperado el 2 de noviembre de 2022 de: 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

3. REGULACIÓN

En esta sección se identifican las normativas nacionales y europeas en materia de residuos y economía circular que pueden afectar a la gestión de los materiales compuestos y, en especial, de las palas eólicas. Se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5: Textos europeos y nacionales sobre la Economía Circular.

Texto	Institución	Publicación
Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. [Disposición Derogada]	Gobierno de España	28/07/2011
Pacto Verde Europeo	Comisión Europea	11/12/2019
Nuevo Plan de Acción para la Economía Circular	Comisión Europea	11/03/2020
Reglamento (UE) 2020/852, de 18 de junio de 2020, relativo al establecimiento de un marco para facilitar las inversiones sostenibles (Taxonomía verde).	Parlamento Europeo y Consejo	18/06/2020
Estrategia Española de Economía Circular (EEEC) "España 2030"	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico	20/06/2020
Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico	07/07/2020
I Plan de Acción de Economía Circular	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico	25/05/2021
PERTE Energías Renovables, Hidrógeno y Almacenamiento	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico	14/12/2021
Decisión (UE) 2022/591, de 6 abril 2022 relativa al Programa General de Acción de la Unión en materia de Medio Ambiente hasta 2030.	Parlamento Europeo y Consejo	06/04/2022
PERTE Economía Circular	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico	08/04/2022
Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una Economía Circular.	Gobierno de España	09/04/2022

Debido a que el desmantelamiento de parques eólicos es todavía anecdótico, las normativas existentes están poco desarrolladas. No existen Normativas internacionales armonizadas y las normas nacionales varían entre países.

El tratamiento que ha de darse a los residuos que genere una instalación eólica durante su funcionamiento viene expresamente contemplado en la correspondiente Declaración de Impacto Ambiental (DIA), aprobada por la Administración competente para la autorización del parque eólico.

3.1. MARCO EUROPEO

La Comisión Europea adoptó en 2020 el **Plan de Acción de Economía Circular** como uno de los principales elementos del **Pacto Verde Europeo**. Entre las medidas que componen dicho plan se encuentran el fomentar productos sostenibles, garantizar una menor producción de residuos, y poner el foco en los sectores que utilizan un mayor número de recursos y que tienen un elevado potencial de circularidad (electrónica y TIC, baterías y vehículos, etc.). No obstante, no propone medidas específicas para los materiales compuestos.

Para Europa, la ambición de convertirse en el primer continente neutro desde el punto de vista climático a través del "Green Deal" requerirá una reorientación de las inversiones hacia proyectos y actividades sostenibles. Una fuerza impulsora de esta ambición es la **Taxonomía de la UE**, (Reglamento (UE) 2020/852) que establece 6 objetivos medioambientales (incluida la transición a una economía circular y la protección y restauración de la biodiversidad y los ecosistemas), con las actividades económicas correspondientes que tendrán un impacto en ese objetivo. Estas actividades económicas, divididas por sectores, se examinarán para comprobar la sostenibilidad medioambiental de sus procesos.

Por otra parte, en abril de 2022 se aprobó el **Octavo Programa de Acción en materia de Medio Ambiente hasta 2030 (VIII PMA)**, sobre la base del Pacto Verde Europeo, con el objeto de establecer la dirección de la acción política medioambiental y climática de la UE hasta 2030. Consta de seis objetivos, entre los que se incluye

- El aceleramiento de la transición hacia una economía circular no tóxica en la que el crecimiento sea regenerativo, los recursos se utilicen de manera eficiente y sostenible y se aplique la jerarquía de residuos;
- La consecución del objetivo de contaminación cero, también en relación con los productos químicos nocivos, a fin de lograr un entorno sin sustancias tóxicas.
- Sostenibilidad ambiental y reducción de presiones asociadas a la producción y el consumo. La energía se encuentra entre los sectores estratégicos.

Los objetivos establecidos en el PMA influirán en todas las políticas y estrategias pertinentes, iniciativas legislativas y no legislativas, programas, inversiones y proyectos a nivel europeo, nacional, regional y local.

De la misma manera, dentro de la normativa europea, existen pocos requisitos para residuos de materiales compuestos [7]. Por ejemplo, dentro de los **códigos LER**, referidos a la Lista Europea de Residuos aprobada por la *Decisión 2000/532/CE de la Comisión, de 3 de mayo de 2000*, no existe una definición clara para los residuos de palas de aerogeneradores, y pueden utilizarse diferentes códigos. Esto supone que la

trazabilidad de las palas desmanteladas sea un reto, complicando su transporte, y evitando que se puedan agregar residuos con las mismas características de orígenes distintos de forma que reciban el pretratamiento que mejor se les adapte antes del reciclaje. Como consecuencia, las empresas de reciclaje son incapaces de conseguir un volumen de residuos de materiales compuestos constante y suficiente.

Una armonización de la clasificación de los residuos de palas de aerogeneradores aumentaría la coherencia en la calidad de los flujos de residuos, así como las cantidades disponibles para su reprocesamiento. Esta armonización también facilitaría el comercio de residuos de palas de aerogeneradores de alta calidad para su reprocesamiento.

Esta categorización armonizada podría aplicarse a través de la lista de clasificación de residuos de la UE -basada en la Lista Europea de Residuos (Decisión 2000/532/CE de la Comisión) y en el anexo III de la Directiva 2008/98/CE, a fin de proporcionar una terminología común a la comunidad de la UE para mejorar la eficiencia de las actividades de gestión de residuos.

Figura 10: Las normativas existentes para tratar a las palas desmanteladas están poco desarrolladas (Fuente: WindEurope).

Por último, se prevé una revisión de la Directiva Marco de Residuos y de la Directiva de vertido de residuos para 2023, con el objetivo común de reducir la producción de residuos y limitar su eliminación final, utilizando objetivos vinculantes más estrictos. Está previsto que se apliquen prohibiciones de vertido para determinados flujos de residuos. Se entiende que ambas revisiones podrían ayudar a promover la circularidad del sector de los residuos de palas de aerogenerador y los usos en cascada, permitiendo

que los sistemas actuales mejoren la recogida, la gestión y el procesado de estos residuos.

Como respuesta a esta falta de normativa europea, WindEurope y AEE lanzaron en junio de 2021 un llamamiento para que se proponga la prohibición en 2025 del traslado a vertedero de las palas de aerogeneradores. **La industria eólica europea, de esta manera, se ha comprometido activamente a reutilizar, reciclar o recuperar el 100% de las palas desmanteladas**.

3.2. MARCO NACIONAL

3.2.1. ESTRATEGIA Y PLANES DE ACCIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR

A nivel nacional, en 2020 se aprobó la **Estrategia Española de Economía Circular (EEEC), España Circular 2030**, la cual se alinea con el Plan de Acción de la Unión Europea. Esta estrategia insta a elaborar planes de acción trienales, que planteen medidas concretas para diferentes sectores. Así, en mayo de 2021 se publicaba el **Primer Plan de Acción de Economía Circular 2021-2023**, el cual incluye dos medidas específicas para el sector eólico:

- Elaboración de una guía para el desarrollo de criterios ambientales a tener en cuenta en el desmantelamiento y repotenciación de instalaciones de generación de energía eólica.
- Impulso de proyectos de I+D+i incentivadores de soluciones de Economía Circular para palas de aerogeneradores eólicos.

3.2.2. PERTE EHRA Y DE ECONOMÍA CIRCULAR

En línea con la Estrategia de EC y su Plan de Acción, el **Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR)** presentado por el Gobierno en abril de 2021 incluye medidas para fomentar el impulso de la economía circular a nivel nacional.

Dentro del PRTR, a finales de 2021 se aprobó el Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) de Energías Renovables, Hidrógeno Renovable y Almacenamiento (ERHA), cuya tercera medida tiene como objetivo la repotenciación de parques eólicos condicionada a la utilización de tecnologías o sistemas de reciclaje de palas eólicas, en coordinación con el PERTE de Economía Circular.

Este segundo PERTE, publicado a principios de 2022, destina una de sus dos Líneas de Acción para tres sectores clave: textil, plástico y de energías renovables, para los que se han presupuestado 300 M€.

Dentro de los objetivos para el sector eólico de este PERTE de Economía Circular se encuentran:

- Impulsar medidas de ecodiseño, que permitan alargar la vida útil de las palas y mejorar su reciclabilidad una vez llegados al final de la misma.
- Búsqueda de alternativas para equipos desechados de los parques eólicos, que pueden tener una segunda vida en otros usos
- Explorar la posibilidad de dedicar a otros usos los aerogeneradores, o sus componentes, que ya no pueden seguir realizando su función como instalaciones de generación eléctrica, pero sí pueden ser viables en otras aplicaciones.
- Creación de un ecosistema de reciclaje de aerogeneradores. Impulso de las tecnologías del reciclaje que recupere las materias primas para nuevos productos, y de la mejora en los procesos de desmantelamiento in situ, de manera que el trasporte de los residuos hasta las plantas de tratamiento genere también un menor impacto.

Figura 11: Desmontaje de una pala de aerogenerador (Fuente: REVE).

3.2.3. LEY DE RESIDUOS Y SUELOS CONTAMINADOS PARA UNA ECONOMÍA CIRCULAR

En España la gestión de residuos se regía por la ***Ley 22/2011****, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados*. Se complementó con el ***Real Decreto 646/2020****, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*, cuyo objetivo es impulsar el tránsito hacia una economía circular, dando prioridad a la prevención de residuos, la preparación para la reutilización y el reciclado. Según este RD, **las palas eólicas son consideradas como residuos de construcción y demolición, no peligrosos y monolíticos**.

En 2022, se aprobaba en el Consejo de Ministros la ***Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una Economía Circular***, que sirve para revisar la normativa de 2011 y adaptarse a los objetivos establecidos por la Unión Europea. Esta Ley está alineada con la **Estrategia Española de Economía Circular**, y recoge algunas restricciones sobre los plásticos de un solo uso, la prevención en la generación de residuos, etc.

Aunque no incluye medidas específicas para los materiales compuestos, esta ley refuerza el orden de prioridad en las opciones de gestión de residuos para que la eliminación en vertedero sea la última opción, obligando a adoptar instrumentos económicos y otras medidas innovadoras. Asimismo, revisa el marco jurídico de la responsabilidad ampliada del productor, precisando las obligaciones en cuanto a la asunción por parte del productor de los costes de gestión de residuos.

Por último, en la nueva ley, se armoniza un impuesto sobre el depósito de residuos en vertederos, la incineración y la co-incineración de residuos.

3.3. MARCO AUTONÓMICO

A nivel autonómico, Andalucía, Castilla-La Mancha, la Comunitat Valenciana, Galicia, Baleares y Navarra han aprobado sus propias leyes de economía circular, y otras comunidades como Canarias o la Comunidad Valenciana se encuentran desarrollando estes tipo de normativas (Figura 12).

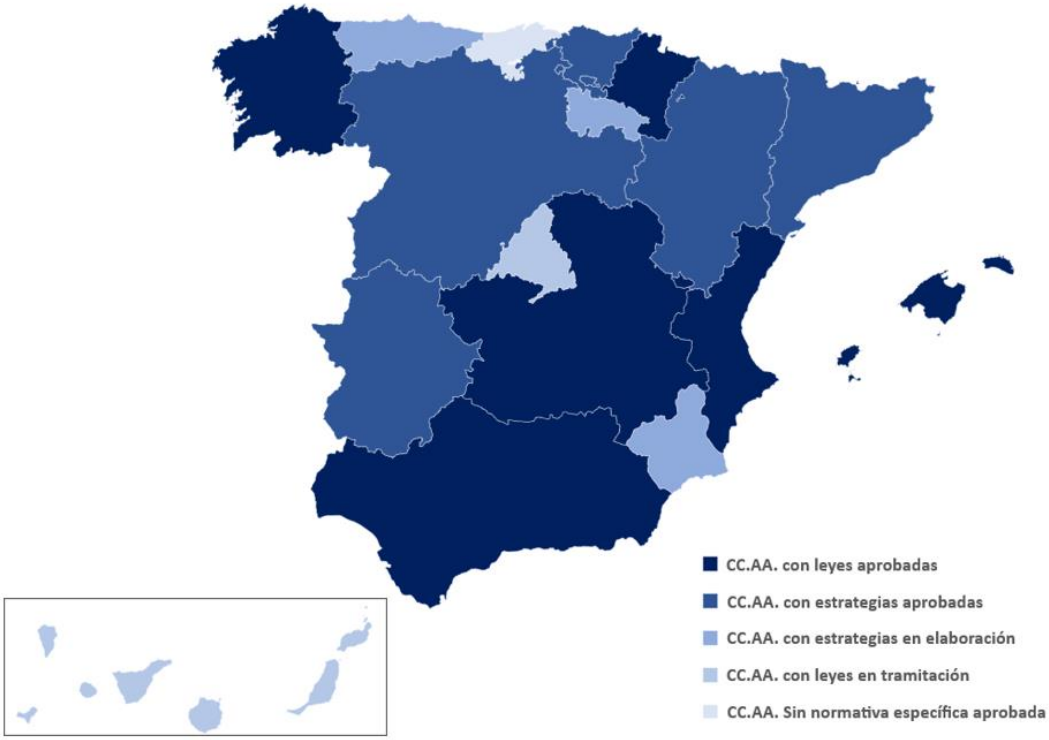


Figura 12: Situación normativa a nivel autonómico (Elaboración AEE).

4. POSIBLES SOLUCIONES

La **circularidad** se refiere al diseño intencionado de sistemas para maximizar la eficiencia, el abastecimiento, la reutilización y la eliminación de materiales renovables y finitos. **La circularidad abarca todo el ciclo de vida del producto y aprovecha la eficiencia de los recursos para minimizar la generación de residuos**, permitiendo que los productos y materiales sigan siendo útiles durante el mayor tiempo posible y transformando los residuos inevitables en un recurso como el calor. Un enfoque circular reduce la dependencia de las materias primas (tanto las producidas en el mercado de la Unión Europea (UE) como las importadas), y proporciona beneficios ambientales y económicos adicionales (por ejemplo, creación de empleo, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero).

El concepto de "**uso en cascada**" está integrado con el principio de circularidad. En publicaciones recientes de la Comisión Europea, el principio de cascada se menciona como un método para retener el "valor añadido" de los materiales el mayor tiempo posible. La cascada se entiende como el uso secuencial de recursos para diferentes fines, normalmente (o idealmente) a través de múltiples fases de (re)uso de materiales antes de recurrir a las operaciones de extracción/recuperación de energía [8].

Lograr los beneficios de la circularidad requerirá disrupción e innovación, incluyendo

1. Un diseño económico que sea regenerativo y restaurador, para permitir la recuperación de componentes y materiales desde el diseño y la eliminación de residuos y contaminación.
2. A nivel de producto, esto requerirá estrategias de diseño de productos (es decir, productos y materiales) que permitan la reutilización, el reciclaje y la cascada.
3. Unos nuevos modelos empresariales que permitan el acceso o el alquiler en lugar de la propiedad guiarán la transformación de los consumidores y usuarios.
4. Un entorno que facilite la recogida de materiales usados. Esto requerirá cambios tecno-económicos en la logística inversa y en los métodos de tratamiento que permitan la devolución de dichos materiales al mercado.
5. Facilitadores y condiciones favorables del sistema que conduzcan a la colaboración entre las cadenas de valor y los sectores y al establecimiento de un sistema circular a gran escala (por ejemplo, asociaciones para el desarrollo de productos, transparencia, intercambio de información y normas sectoriales)

A la hora de presentar las posibles soluciones tras la desinstalación de una pala eólica conviene partir de la jerarquía de los residuos establecida por la UE en la Directiva

2008/98/EC sobre Gestión de Residuos y recogida en la *Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular* (Figura 13).

Figura 13: Jerarquía de Residuos establecida por la UE.

Según dicha jerarquía, la estrategia de gestión de residuos debe incluir objetivos para su reducción, recuperación de material y/o energía mediante la reutilización, el reciclaje y el reprocesamiento, limitando la incineración y la entrega a vertedero, que deben quedarse como últimas alternativas. Asimismo, la jerarquía de residuos está alineada con el uso en cascada de materiales, enfocado a retener el "valor añadido" de los materiales el mayor tiempo posible.

4.1. PREVENCIÓN DE RESIDUOS

La mejor estrategia parte de evitar la generación de residuos (prevención) y, para que sea eficaz, debe ser considerada durante el diseño de la pala. Puede alcanzarse mediante alguno de los siguientes objetivos, complementarios entre sí [9]:

- **Reducción del material utilizado en la fabricación**, lo que supondrá un menor volumen de residuos y de materiales a reciclar. En esta categoría se encuentran las herramientas de ecodiseño, como la integración de criterios de economía circular en el diseño de las palas eólicas; y algoritmos de optimización de diseño multicriterio. Sin embargo, ambas se encuentran poco desarrolladas. Se están llevando a cabo proyectos a nivel europeo como es el caso de DREAMWIND, FiberEUse y ZEBRA.

- Aumento en la eficiencia de los productos fabricados, que conlleven **una menor tasa de fallo y un alargamiento de la vida útil de las palas**. Entre las soluciones que están siendo analizadas y desarrolladas se encuentran la utilización de polímeros autorreparables; mejora de la ductilidad, resistencia a la fatiga y de la adhesión fibra-resina; y la aplicación de *gelcoats* y revestimientos superficiales para la protección de la superficie de las palas.
- **Diseño para la reciclabilidad en la etapa de fin de vida.** En proyectos como ZEBRA se está investigando el uso de matrices termoplásticas que, como se ha explicado anteriormente, tienen una mayor reciclabilidad (Figura 14).
- **Mejora de la separación de componentes y materiales** en la etapa fin de vida. Aunque todavía se encuentran en fase de investigación, se está trabajando en diversas tecnologías novedosas de enlace (e.g. adhesivos termoplásticos), y en la reticulación reversible de resinas termoendurecibles.
- **Sustitución de materiales tóxicos** o difíciles de reciclar por otros más ecológicos.

Figura 14: El proyecto ZEBRA busca lograr una pala totalmente reciclable (Fuente: LM Wind).

4.1.1. PROYECTOS RELACIONADOS CON LA PREVENCIÓN DE RESIDUOS

Como se ha mostrado en apartados anteriores, diversas empresas han adoptado el reto de impulsar la economía circular en el sector eólico desde la fase de diseño a través de numerosos proyectos y esperan poder fabricar aerogeneradores sin desperdicio en las próximas décadas.

Entre los avances tecnológicos que se están llevando a cabo en esta área, en 2020, Covestro, Goldwind y LZ Blades desarrollaron la primera pala eólica en la cual se ha sustituido la resina epoxi por poliuretano, consiguiendo una longitud de 64,2 m. Este tipo de material, comparado con la resina epoxi, permitirá la fabricación de palas de mayor longitud y resistencia por sus mejores características mecánicas. Además, supondría una reducción de costes en la fabricación de palas para aerogeneradores [10].

DREAMWIND

DREAMWIND (Designing REcyclable Advanced Materials for WIND energy)

Colaboradores

AARHUS UNIVERSITY DTI Vestas

Objetivo

Desarrollar nuevos materiales sostenibles que puedan ser usados en palas eólicas y que puedan ser separados cuando se llegue al final de su vida útil, de forma que las fibras de vidrio puedan ser recicladas.

Las investigaciones se han centrado en diseñar un nuevo agente aglutinante para la fibra de vidrio que permita su reutilización para nuevos componentes. De esta forma, se puede retener el valor del material, en vez de descartarlo y requerir de nuevo material virgen.

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

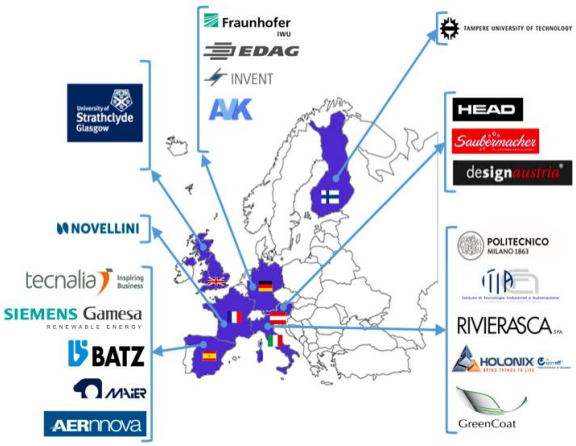
Web: http://www.dreamwind.dk/en/

Figura 15: La investigación es vital para la implementación de estrategias de economía circular en la eólica (Autor: A. Martínez).

FiberEUse

FIBEREUSE

Colaboradores



Objetivo

Demostración a gran escala de una cadena de valor de economía circular basada en la reutilización de materiales compuestos. Se buscó integrar diferentes innovaciones a través de un enfoque holístico para aumentar la rentabilidad de la reutilización y el reciclaje de GFRP y CFRP. Esto se ha llevado a cabo a través de TIC basadas en la nube, búsqueda de nuevos mercados, análisis de las barreras legislativas, evaluación del ciclo de vida, etc.

El proyecto se basó en tres casos demostrativos:

- Reciclaje mecánico de fibras cortas y reutilización.
- Reciclaje térmico de fibras largas y reutilización.
- Inspección, reparación y reprocesamiento de fibras de carbono.

El proyecto fue financiado por la UE con 10 M€, y ejecutado entre 2017 y 2021.

Web: http://fibereuse.eu/

En 2021, Siemens Gamesa presentó para su uso comercial en *offshore* su primera pala reciclable (***RecyclableBlade***) utilizando un nuevo tipo de resina que puede separarse con facilidad del resto de componentes de la pala al final de su vida útil, facilitando la reutilización de los materiales recuperados para otras aplicaciones y sectores. Con esta innovación la compañía espera alcanzar la meta de palas offshore 100% reciclables en los próximos años [11].

El primer aerogenerador (SG 8.0-167 DD, de 167 m de rotor) equipado con estas palas reciclables fue instalado en 2022 en el parque eólico marino Kaskasi en Alemania [12]. Actualmente, la misma solución está también disponible para tecnologías terrestres.

ZEBRA (Zero wastE Blade ReseArch)

Colaboradores

Objetivo

Demostración a gran escala de la importancia técnica, económica y medioambiental de las palas eólicas fabricadas a partir de materiales compuestos termoplásticos, con un enfoque de ecodiseño para facilitar su reciclabilidad.

LM fabricará dos prototipos usando una resina termoplástica, para comprobar y validar su viabilidad para su producción industrial. En paralelo, se desarrollará y optimizará el proceso de fabricación usando soluciones de automatización, para reducir el consumo energético y los residuos generados. Posteriormente, se investigarán maneras de reciclar los materiales compuestos usados en los prototipos y se realizará una evaluación de ciclo de vida.

El proyecto, que comenzó en septiembre de 2020, durará 42 meses y contará con 18,5 M€ de presupuesto.

Otro ejemplo de línea de investigación es el surgido a partir de un estudio llevado a cabo por Arbórea Intellbird e Innovagenomics, en el cual documentaron la existencia de comunidades microbianas en las superficies de las palas. Tras analizar las muestras e identificar las comunidades de microorganismos presentes, encontraron ciertas bacterias que realizaban la degradación de la resina epoxi de las palas, lo que abre la puerta al futuro desarrollo de tecnologías de **bio-procesamiento** de las palas [13].

La investigación y desarrollo de nuevos materiales compuestos para aplicaciones estructurales y la preocupación por su reciclaje o reutilización no es exclusiva del sector eólico. De hecho, se espera que el sector eólico sólo represente el 10% de los residuos de materiales compuestos termoestables en Europa en 2025 [2]. La aeronáutica, la automoción, la industria naval y la construcción, sectores que también hacen un uso

intensivo de materiales compuestos termoestables, tienen entre sus objetivos la inclusión de prácticas de economía circular y sostenibilidad, por lo que la eólica puede encontrar sinergias con estos sectores en la búsqueda de nuevas soluciones. Por ejemplo, en el sector aeronáutico 12.000 aeronaves están acercándose al final de vida útil, lo que supondrá un gran incremento de los residuos de materiales compuestos en los próximos años [14].

Entre los proyectos específicos que están llevándose a cabo en otros sectores, el centro tecnológico Aitiip está coordinando el proyecto **BIZENTE**, cuyo fin es desarrollar una tecnología que permita la degradación de materiales compuestos termoestables que solucione sus problemas de fin de vida [15].

BIZENTE

Colaboradores

Objetivo

Su objetivo es demostrar el potencial de la utilización de enzimas mutadas de la familia de las ligninasas para conseguir la degradación de los materiales compuestos termoestables, de forma que se consiga resolver su problema de fin de vida.

Para ello, desarrollarán una tecnología enzimática biodegradable que, tras ser probada en laboratorio, se ensayará su uso en entornos piloto semi-industriales. Esto permitirá un aumento del TRL de la tecnología y establecerá una nueva cadena de valor circular para los productos obtenidos tras la biodegradación.

BIZENTE comenzó en 2020 y tendrá una duración de 4 años, hasta 2024, con una financiación de 2,5 M€.

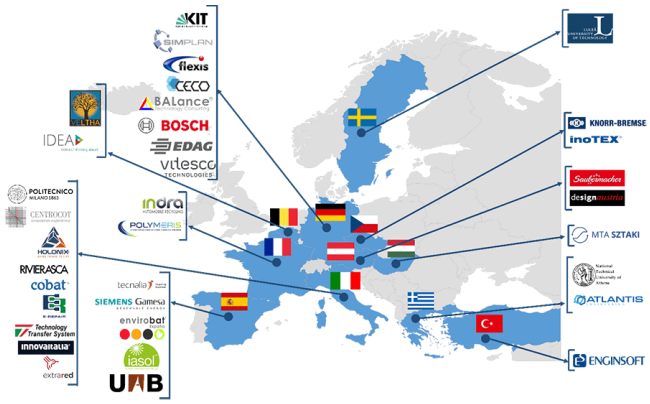
Web: *https://bizente.eu/*

Favoreciendo la colaboración intersectorial, también se está llevando a cabo el proyecto **DigiPrime**, el cuál desarrollará el concepto de una plataforma digital de economía circular con el fin de crear modelos comerciales circulares basados en la recuperación mejorada de datos y la reutilización de funciones y materiales.

DigiPrime

DIGIPRIME

Colaboradores



Objetivo

El proyecto creará y operará un modelo federado de plataformas digitales para negocios intersectoriales en la economía circular. DigiPrime será validado a través de varios pilotos intersectoriales (automotriz, energías renovables, electrónica, textil y construcción).

DigiPrime comenzó en 2020 y tendrá una duración de 4 años, hasta diciembre de 2023, con un presupuesto de 19,6 M€.

Web: *https://www.digiprime.eu/project/*

Por último, en España desarrolla su actividad el **Grupo Interplataformas de Economía Circular** (GIEC), formado por 26 Plataformas Tecnológicas y de Innovación, entre las que se encuentra REOLTEC, la plataforma tecnológica del sector eólico español. GIEC tiene como objetivos principales promover el concepto de Economía Circular y el uso eficiente de los recursos a través de la colaboración público-privada, contribuyendo a la implementación de estrategias nacionales de Economía Circular y favoreciendo la puesta en marcha de proyectos colaborativos de I+D+i [16].

4.1.2. I+D+I. ESTUDIO DE PATENTES SOBRE PREVENCIÓN DE RESIDUOS

A pesar de los avances conseguidos hasta el momento en el sector, la investigación sigue siendo vital para la implementación de medidas de economía circular en la eólica en los próximos años y avanzar en nuevas soluciones de fin de vida sostenibles.

En la Tabla 6 se resumen las áreas activas relacionadas con la investigación de materiales para las palas de los aerogeneradores.

Tabla 6: Áreas activas en cuanto a investigación de materiales para los aerogeneradores [7].

	ÁREAS EN LA INVESTIGACIÓN DE MATERIALES	EFECTO
Diseño de Procesamiento	Modelado de proceso con el objetivo de optimizar y controlar con precisión el proceso de curado de los materiales compuestos.	Aumento de la vida útil de las palas.
Proceso	Incorporar procesos de fabricación automatizados para asegurar la consistencia en las propiedades del material y conseguir técnicas de fabricación más robustas.	Aumento de la vida útil de las palas.
	Promover procesos de fabricación eficientes a nivel de costes y consumo energético para los PRFC (o CFRP), dado que con este material se consiguen mejores propiedades mecánicas. Como beneficio secundario, es más atractivo económicamente el recuperar la fibra de carbono que el recuperar la fibra de vidrio.	Permitir la fabricación de palas de mayor tamaño.
Materiales	Introducir innovaciones en las combinaciones resina/fibra, con mejores ductilidades y resistencia a la fatiga.	Aumento de la vida útil de las palas.
	Nuevas resinas termoplásticas infundibles que puedan ser procesadas mediante polimerización en molde y que tengan mejores propiedades mecánicas.	Reducción de costes.
	Introducción de nano-componentes como agentes reforzadores en la matriz y en los revestimientos superficiales, a la vez que se respeten los requisitos de seguridad y salud y asegurando que no lleven a métodos de reciclaje más complejos.	Aumento de la vida útil de las palas.
	Investigar arquitecturas de fibra, combinando fibra de vidrio de alto rendimiento, fibras de carbono y fibras conseguidas a través de la nano-ingeniería, para conseguir refuerzos híbridos.	Mejores propiedades de las palas, aumento del tamaño de fabricación de las palas.
	Investigar revestimientos superficiales duraderos para asegurar una mejor resistencia a la erosión (*gelcoats*, sistemas de pintura y cintas, polímeros autorreparables).	Aumento de la vida útil de las palas.
	Desarrollo de bio-resinas para rendimientos mejorados, aprovechándose de la mayor disponibilidad de los residuos orgánicos.	Disponibilidad continuada de materias primas y seguridad en el suministro tras el agotamiento de las materias primas fósiles; reducción de la huella de carbono.
	Desarrollo de resinas 3R, nueva familia de resinas y materiales compuestos mejorados con un reprocesamiento, una reparabilidad y unas propiedades de reciclabilidad perfeccionadas.	Aumento de la vida útil de las palas. Mejora de la reciclabilidad.

Aunque no toda innovación se patenta, se podría decir que las patentes son la forma tangible de analizar la innovación desarrollada por un sector. Sobre las 2.315 patentes analizadas para el rotor en el informe de **REOLTEC, *Innovación en el Sector Eólico. 2000-2020***, 398 de ellas se pueden englobar dentro del campo de los materiales y fabricación de las palas (Palas, Fibra de Carbono y Fibra de Vidrio), como se recoge en el Gráfico 1.

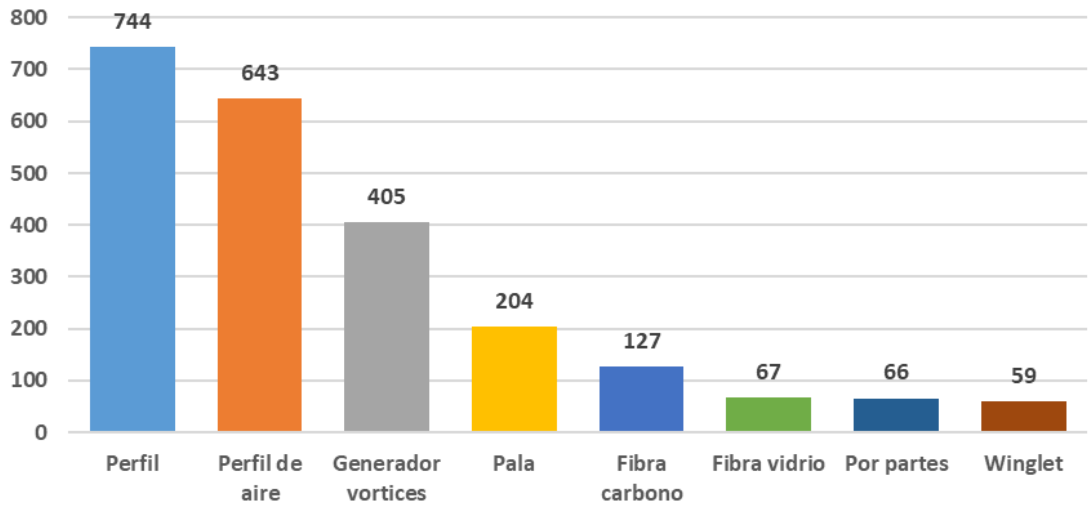


Gráfico 1: Distribución de patentes del rotor por temáticas [17].

Muchas de estas patentes provienen de la industria, siendo Wobben Enercom, Vestas, Siemens Gamesa y LM Wind Power las empresas que mayor número de patentes poseen en el ámbito del rotor.

4.2. REUTILIZACIÓN DE LAS PALAS DENTRO DEL SECTOR EÓLICO

En el caso de las palas que se desinstalarán en los próximos años, la solución más sencilla será su reutilización en otra ubicación distinta, de forma que su vida de servicio sea extendida.

En ocasiones, a la hora de realizar una desinstalación, los activos pueden encontrarse en buen estado y, aunque las palas eólicas son diseñadas para 20 años, tras ese periodo todavía pueden tener una alta capacidad residual. Por ello, en el desmantelamiento de un parque eólico, la primera consideración que debe tenerse en cuenta es la posibilidad de recuperar los equipos, incluidas las palas, que por su naturaleza y estado siguen manteniendo un valor importante, y que pueden seguir siendo utilizados en otras instalaciones eólicas.

4.2.1. EVALUACIÓN TÉCNICA DE EXTENSIÓN DE VIDA

Para poder proceder a la reutilización de palas, primero se debe conocer su vida remanente realizando una evaluación técnica y un estudio de viabilidad, en el cual se tienen en cuenta diversos factores como son el tiempo que ha estado en servicio y su modo de uso. Los procesos más habituales para la evaluación de las palas suelen incluir inspecciones visuales y ultrasónicas, y la medición de las frecuencias naturales de la pala, para proceder posteriormente y si es necesario, a su reparación, refuerzo y pintura.

A nivel internacional, se encuentra en curso de desarrollo una nueva especificación técnica de IEC, la **IEC TS 61400-28**, para realizar una buena gestión y la extensión de vida de parques eólicos.

4.2.2. MERCADO DE AEROGENERADORES DE SEGUNDA MANO

Una vez realizada la evaluación técnica, diversas empresas a nivel internacional se dedican a la venta de los activos de parques desmantelados para otros proyectos:

- **Surus Inversa**. Empresa española que realiza la evaluación de los activos para comprobar la posibilidad de ampliar su ciclo de vida, su desinstalación y desmantelamiento, y, finalmente, su reempleo. En España, esta empresa realizó el desmantelamiento de los parques eólicos de Malpica, Zas y Corme (Figura 16), reutilizando parte de los elementos en otras plantas del propietario y comercializando el resto para que pudiesen ser reinstalados en otras ubicaciones a través de su plataforma virtual de subastas **Escrapalia** [18].

Figura 16: Desmantelamiento de los parques eólicos Zas y Corme llevada a cabo por Surus Inversa (Fuente: Surus Inversa).

- **Spares in Motion**. Plataforma on-line internacional para el mercado de post venta de activos de aerogeneradores [19].
- **Repowering Solutions**. Compañía que opera a nivel internacional dedicada al mercado secundario de activos de plantas de energía, que tiene como modelo de negocio la economía circular. Desmantelan parques eólicos con el objetivo de reutilizar los activos rehabilitados, como las palas y los bujes, en nuevos proyectos, de forma que ayudan a reducir el número de residuos generados [20].
- **Wind-turbine.com**. Mercado on-line internacional para vender y comprar piezas de repuesto y accesorios para aerogeneradores [21].

4.3. REUTILIZACIÓN EN USOS DISTINTOS

En el caso de que la evaluación técnica de la pala concluya que esta no puede seguir siendo utilizada en aerogeneradores, o que no se encuentre disponible un mercado de segunda mano para su reinstalación, se puede plantear la reutilización de la pala para propósitos no relacionados con los parques eólicos, aprovechando, de esta manera, sus excelentes características mecánicas. Dentro de las opciones planteadas se encuentran:

- Mobiliario urbano (Figura 17),
- Barreras acústicas en carreteras o vías ferroviarias,
- Reservas de agua,
- Torres de telecomunicación o de transmisión de electricidad,
- Asientos de gradas,
- Atenuadores de olas en zonas costeras,
- Techos de naves y viviendas (Figura 18),
- Material para impresión 3D (tras ser procesadas y convertidas en polvo).

Figura 17: Posible reutilización en parques infantiles de palas eólicas desinstaladas [23] [53].

Figura 18: Aplicación de palas de aerogeneradores desmanteladas para tejados [22].

Sin embargo, y aunque esta solución permite extender la vida de una pala con poco esfuerzo, el número de aplicaciones posibles es reducido. Hasta el momento, los ejemplos de reutilización de palas son solo proyectos de demostración testimoniales que no se pueden considerar soluciones a gran escala para el futuro.

La empresa *SuperUse* ha desarrollado varios proyectos de reconversión de palas en parques infantiles, como mobiliario urbano (Figura 17 y Figura 19) y como barreras acústicas para vías ferroviarias o carreteras [23].

Figura 19: Palas eólicas reutilizadas como mobiliario urbano en Rotterdam [23].

Otra alternativa planteada es el aprovechamiento de las cualidades y dimensiones de las palas, así como el hecho de que no están fabricadas de materiales tóxicos, para reutilizarlas como reservas de agua de múltiples usos (riego, higiene, combate de incendios) en zonas donde el agua potable es un recurso escaso. Se estima que en una pala de 70 m de longitud pueden almacenarse hasta 150 m^3 de agua (Figura 20).

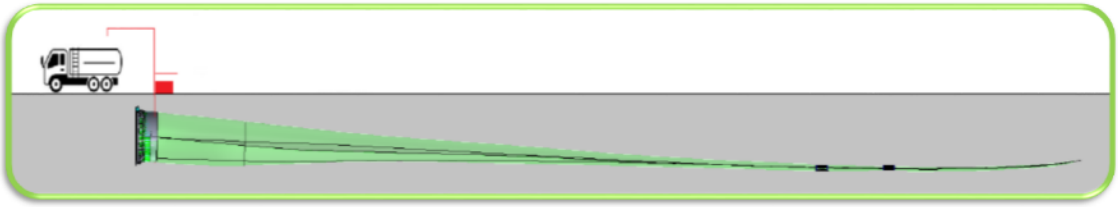


Figura 20: Reutilización de palas de aerogenerador como reservas de agua para usos múltiples (Fuente: Marco Asesoramiento Ambiental).

Para impulsar este tipo de soluciones, una posible línea de trabajo sería la creación de una gama de productos que puedan ser comercializados. Un ejemplo de este tipo de iniciativas es la empresa de ropa **Ecoalf**, la cual utiliza materiales reciclados, como poliéster PET, nylon y neumáticos, para fabricar diversas prendas de ropa y accesorios. Ecoalf ya ha llevado a cabo colaboraciones con diversas empresas, como la desarrollada con FELDER para conseguir la transformación de la corteza de las piñas en zapatillas; o con SWATCH, para quien ha diseñado uniformes fabricados con tejidos reciclados de botellas de plástico [24].

4.4. RECICLAJE DE LOS MATERIALES

Si la pala carece de vida remanente y no puede ser reutilizada, la siguiente opción en la jerarquía de residuos es el reciclado material. Es decir, la pala se convierte en un nuevo producto con un uso funcional distinto, aunque el material pierda valor.

Tal como se explica en el presente documento, al utilizar las palas resinas termoestables, los materiales compuestos resultantes no pueden ser fundidos al final de su vida útil y es complicado separar la matriz de las fibras de refuerzo. Esto supone que los procesos específicos para el reciclaje de este tipo de materiales sean complejos y estén en desarrollo, sin que uno de ellos se haya logrado imponer, pudiéndose distinguir tres tipos de reciclado: mecánico, térmico y químico.

En la Figura 21 se comparan las **diferentes tecnologías de reciclaje** que están siendo consideradas, con el coste relativo actual de cada una y su nivel TRL (*Technology Readiness Level*, medida para describir el nivel de madurez de la tecnología).

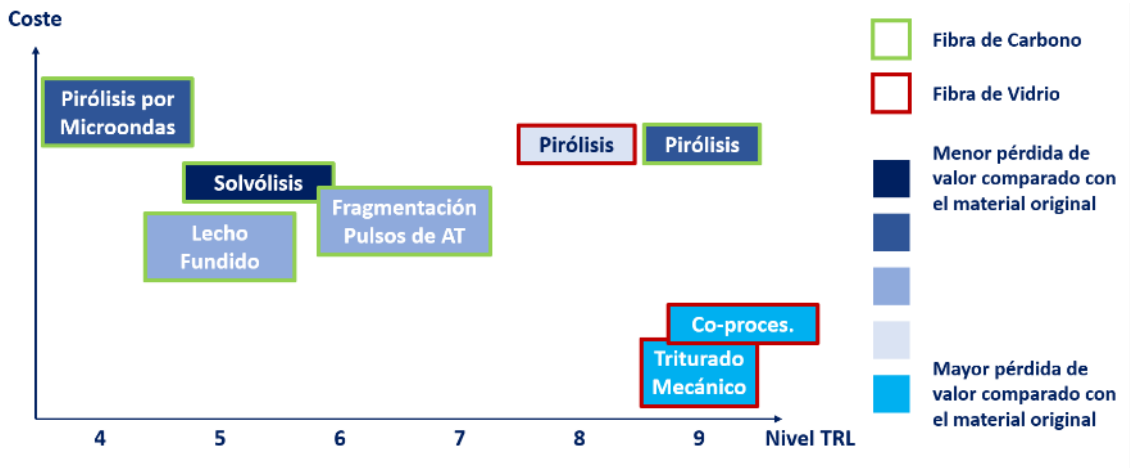


Figura 21: Comparativa de las diferentes tecnologías, adaptado de [25].

Una vez que las fibras y otros materiales se recuperan a través de estos procesos, generalmente requieren etapas adicionales para transformarlos en nuevos materiales que puedan ser utilizados en la fabricación de productos para gran variedad de industrias y sectores (e.g. piezas de automóviles, equipamiento deportivo como palas de pádel). Se puede recurrir a pre y post-procesamiento para mejorar la calidad del material reciclado, como puede ser la aplicación de tratamientos superficiales a las fibras recicladas.

Uno de los principales objetivos de este tipo de soluciones, además de su escalabilidad y la reducción de costes**, es obtener un producto del proceso de reciclaje con características consistentes y homogéneas para facilitar su reutilización como materia prima secundaria**.

Uno de los principales retos para lograrlo es la **falta de información sobre la composición de los materiales compuestos** a reciclar, dado que los procesos de reciclaje dan resultados óptimos cuando se ajustan para la composición del material. Existen una gran variedad de combinaciones de materiales compuestos que se pueden obtener al usar los fabricantes diversos tipos de fibras, matrices y aditivos, así como diferentes proporciones de cada uno de ellos. Los suministradores de los materiales o de los componentes no están obligados a compartir esta información y, en general, prefieren no hacerlo.

Además de esa falta de información, otro de los grandes retos de este tipo de tecnologías es **conseguir un material reciclado homogéneo** a partir de una fuente de suministro heterogénea como es una pala de aerogenerador, donde pueden encontrarse diferentes tipos de fibra de vidrio y, además, en diferentes formatos. Este es un reto común al sector del reciclado de palas, con independencia de la tecnología que se use para separar la matriz del refuerzo.

4.4.1. RECICLAJE MECÁNICO

El reciclado mecánico de las palas consiste en su triturado y posterior utilización del material resultante para la obtención de nuevos productos.

Generalmente, el proceso comienza en el parque eólico, donde las palas son cortadas en segmentos para facilitar su traslado en camión o tren a plantas de preprocesamiento. Para minimizar las emisiones de polvo, el corte de las piezas se realiza humidificando la zona de trabajo y recogiendo el fluido final.

Una vez en las plantas de reciclado, los segmentos de pala son triturados mecánicamente, aunque también se están investigando otros procesos como la fragmentación por pulsos de alta tensión.

I. MÉTODOS DE RECICLAJE MECÁNICO

1. TRITURADO MECÁNICO

En las instalaciones de preprocesamiento, las palas son cortadas y trituradas en trozos de pequeño volumen. Además, los metales son separados mediante imanes del resto de materiales.

El triturado mecánico tiene una gran eficiencia, por lo que es utilizado debido a su pequeño coste y la baja intensidad energética necesaria. Sin embargo, el material resultante tiene un valor significativamente menor debido a la reducción de sus propiedades mecánicas. El producto obtenido, principalmente fibra de vidrio, puede ser utilizado de relleno o como refuerzo.

2. 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 la matriz de las fibras mediante el uso de electricidad.

Como ventaja, comparado con el triturado mecánico, las fibras que se obtienen son de mayor longitud y limpieza. Sin embargo, este proceso tiene como limitación la degradación que sufren las fibras como resultado de las altas intensidades utilizadas.

Hasta la fecha sólo se han podido recuperar a través de este proceso fibras de pequeño tamaño y se requieren para ello grandes niveles de energía. Se trata de una tecnología que se encuentra todavía en fase de investigación [7].

II. APLICACIONES

Una vez obtenido el material triturado como producto del reciclaje mecánico, existen y se están desarrollando procedimientos y materiales donde poder utilizarlo, siendo el más implementado en la actualidad su uso como materia prima en el co-procesamiento del cemento. A continuación, se detallan algunas de estas aplicaciones.

1. CO-PROCESAMIENTO DEL CEMENTO

La producción de cemento es, actualmente, la tecnología principal para la utilización del material que se obtiene como residuo del reciclaje mecánico de las palas eólicas.

En este proceso, ciertas materias primas del cemento (carbonato cálcico) son reemplazadas parcialmente por el material compuesto triturado, aprovechando además la fracción orgánica como combustible en el propio proceso, sustituyendo parcialmente al carbón. Esto significa que, a través de esta aplicación, se puede reducir significativamente el uso de la energía utilizada y la generación de CO_2 asociada a la producción de cemento.

El co-procesamiento del cemento ofrece una alternativa robusta y escalable para el tratamiento de los materiales compuestos. Es un proceso muy prometedor en términos económicos por su alta eficiencia. Además, es un tratamiento rápido que permite procesar grandes cantidades de residuos sin tener cenizas como subproducto.

Sin embargo, la adición de fibra al cemento implica también una variación de sus propiedades que puede derivar en principalmente dos problemáticas de usar materiales compuestos triturados para la fabricación de cemento:

- Las propiedades ácidas del cemento pueden provocar que la fibra de vidrio se deteriore con el tiempo. Además, la fibra de vidrio puede tener efectos negativos en la dureza, maleabilidad y la resistencia a la congelación del cemento, lo que

puede llevar a la necesidad de que el cemento sea reemplazado con mayor frecuencia.

- La superficie que crea la resina en materiales compuestos reduce la fuerza de enlace entre el cemento y el material compuesto [4].

Para evitar estos inconvenientes, cobra especial importancia la obtención de una calidad consistente del material compuesto triturado de manera que se consigan mejores propiedades en el cemento. Esto se logra a través de una adecuada separación y limpieza de los residuos obtenidos del triturado del material compuesto.

La utilización de materiales compuestos reciclados en la fabricación de cemento es, a corto plazo, una de las principales soluciones para las palas eólicas desmanteladas. Esto se pone de manifiesto en noticias como el acuerdo firmado en 2020 entre GE Renewable Energy y Veolia para la utilización de material compuesto de palas reciclado mecánicamente para la producción de cemento en Estados Unidos. Este acuerdo no sólo supone una solución al fin de vida para las palas, sino que se espera que reduzca en un 27% las emisiones relacionadas con la fabricación de cemento [26].

Actualmente, en Alemania se encuentra en funcionamiento la única planta cementera que lleva a cabo este proceso a partir de material compuesto de palas de aerogeneradores desmanteladas, Holcim Lägerdorf (Figura 22).

El proyecto *DecomBlades*, presentado en el próximo apartado, también se encuentra investigando el uso de material triturado de la pala para la producción de cemento.

Figura 22: Holcim Lägerdorf, única planta cementera en utilizar residuos de palas para la fabricación de cemento (Fuente: WindEurope).

2. FIRMES DE CARRETERA

En la construcción y mantenimiento de los firmes de carretera existe un gran interés en mejorar las propiedades mecánicas del asfalto de manera que se evite la formación de grietas y su propagación. Una de las opciones estudiadas ha sido la inclusión de fibra de vidrio en la estructura del asfalto de forma que se consiga mejorar su resistencia [27].

Combinando este objetivo con el que nos ocupa, nace el proyecto europeo ***Life Refibre***, en el cual se buscaba tratar mecánicamente las palas, obteniendo fibra de vidrio corta que pudiese ser utilizada en la fabricación de aglomerado asfáltico. Se conseguiría,

además, mejorar las propiedades mecánicas del asfalto. El producto obtenido en el proyecto fue utilizado en la construcción de 1.500 *m* de carretera (Figura 23).

El proceso desarrollado en el proyecto para el reciclaje mecánico de las palas fue:

1. Pretratamiento para mejorar el reciclaje mecánico,
2. Trituración primaria de las palas a reciclar,
3. Separación de los materiales de la pala,
4. Segundo triturado únicamente de la fibra de vidrio,
5. Separado de la fibra de vidrio por tamaños.

Una vez obtenida la fibra de vidrio triturada, se probaron y monitorizaron en el firme construido diferentes porcentajes de fibra de vidrio a incluir en el asfalto para comprobar su comportamiento y la mejora de propiedades conseguida (aumento de la durabilidad, de la resistencia a la deformación, de la resiliencia, de la resistencia a la fatiga, resistencia a temperaturas extremas y una pequeña mejora de las propiedades sonoras) [5].

Figura 23: Asfalto fabricado incluyendo fibra de vidrio reciclada de palas de aerogeneradores [5].

3. PANELES Y BARRERAS ACÚSTICAS

El material compuesto triturado puede ser utilizado en paneles y barreras de aislamiento acústico mediante el uso de pegamentos para conseguir el aglomerado.

Esta aplicación ha sido desarrollada por una empresa danesa, *Miljøskærm* (Figura 24), la cual consigue productos a partir de palas trituradas cuyos estudios acústicos son similares a los de los paneles acústicos actualmente utilizados [28].

Sin embargo, esta solución está todavía en desarrollo y no se encuentra a nivel industrial.

Figura 24: Barreras acústicas fabricadas a partir de palas recicladas (Fuente: Miljøskærm).

4. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Otra aplicación para la utilización del producto obtenido del procesamiento mecánico puede ser la fabricación de elementos de construcción.

Proyectos como **LIFE+BRIO** han buscado mejorar los procesos de reciclado mecánico, de forma que optimicen la recuperación de fibras y se fomente la economía circular dentro del sector eólico mediante la utilización del producto obtenido para la elaboración de nuevos elementos [29]. En este proyecto, cuyos socios fueron Iberdrola, Fundación Gaiker y Tecnalia, los productos obtenidos del reciclaje mecánico fueron reutilizados para (Figura 25):

- **Prefabricados de hormigón**, donde las fibras sirven como refuerzo.
- **Paneles Sándwich**, donde se utiliza la fibra, junto con diversas resinas, como material de núcleo.

Figura 25: Prefabricado de hormigón (izquierda) y panel sándwich (derecha) fabricados a partir de material compuesto de palas de aerogeneradores [29].

4.4.2. RECICLAJE TÉRMICO

Los procesos de reciclaje térmico se basan en la aplicación de altas temperaturas a los residuos de las palas para conseguir la combustión de la parte orgánica y obtener como producto las fibras, las cuales pueden ser recuperadas y reusadas para la fabricación de nuevos materiales compuestos.

Sin embargo, y como principal inconveniente, las altas temperaturas utilizadas en estos tratamientos reducen las propiedades mecánicas de las fibras obtenidas, por lo que este tipo de procesos térmicos requieren de un control estricto de sus parámetros (atmósfera, temperatura y tiempo de residencia) para minimizar dicha degradación. A modo de ejemplo, a 450ºC, las fibras de vidrio reducen su resistencia a la tracción un 50%, alcanzando un 80% de reducción a 550ºC. Por su parte, las fibras de carbono presentan una menor degradación con la temperatura, de alrededor del 25% al ser procesadas a 550ºC [30].

Dentro de los procesos de reciclaje térmico existen varias alternativas, incluyendo la pirólisis, la pirólisis por microondas y el proceso de lecho fundido.

I. PIRÓLISIS

La pirólisis es la descomposición térmica de materiales a elevadas temperaturas y en atmósferas inertes (ausencia de oxígeno). Se trata de un proceso de reciclaje que ya es empleado para otras aplicaciones.

Al aplicar pirólisis a las palas de los aerogeneradores, la matriz polimérica se degrada hasta conseguir una mezcla de hidrocarbonos, obteniendo como producto del proceso las fibras de vidrio. Además, las fibras pueden ser recuperadas y reutilizadas para otras aplicaciones no estructurales, lo que supone su ventaja más importante.

Aunque las temperaturas utilizadas en este proceso son inferiores a las empleadas en otras tecnologías, siguen siendo lo suficientemente elevadas para dañar la superficie de las fibras, conllevando cierta degradación en las mismas y, por lo tanto, una disminución de las propiedades mecánicas [31].

Otra de sus desventajas actuales de este tratamiento es su alto coste de inversión y operación, por lo que su viabilidad económica depende de la escala y de la reutilización que las fibras pueden tener. Por el momento, este proceso sólo es económicamente viable para el caso de las fibras de carbono, aunque no se ha implementado todavía a gran escala por los pequeños volúmenes de materiales compuestos con fibra de carbono a tratar en la actualidad. Sin embargo, se espera que en los próximos años esto cambie y la pirólisis se convierta en una solución de gran importancia [7].

Una ventaja adicional de la pirólisis es que, al igual que la fibra de vidrio recuperada, la mezcla de hidrocarburos obtenida en el proceso de pirólisis también es considerada como materia prima secundaria valorizable. Los gases obtenidos como resultado de la combustión de la matriz pueden ser utilizados como fuente de energía, convirtiendo el proceso en autosostenible con relativa poca huella ambiental.

La pirólisis es actualmente la tecnología de reciclaje térmico más avanzada a nivel comercial.

II. PIRÓLISIS POR MICROONDAS

La pirólisis por microondas en un proceso alternativo a la pirólisis convencional, en la cual el material es calentado por radiación microondas, lo que permite que el calentamiento sea uniforme en toda la pieza. Los polímeros tienen una conductividad térmica muy baja, por lo que, al recurrir a microondas, la temperatura utilizada puede ser inferior, consiguiendo así una menor degradación de las fibras [32].

Por tanto, su ventaja primordial es que permitiría conservar mejor las propiedades mecánicas de las fibras que se pierden en el caso de la pirólisis convencional, reduciendo la cantidad de energía utilizada. Además, se trata de una tecnología en la que se puede implementar un control más preciso [7] [30].

Sin embargo, esta tecnología está todavía a nivel de investigación, encontrándose en la fase de validación en laboratorios y ambientes relevantes.

III. LECHO FLUIDO

El proceso de reciclaje por lecho fluido se utiliza para quemar la resina matriz del material compuesto y poder obtener las fibras como producto de la combustión. Para ello, las palas son trituradas hasta conseguir pellets de pequeño tamaño, que son introducidos en el reactor de lecho fluido, donde alcanzan temperaturas de hasta 550ºC [31].

Entre otras ventajas, este método, comparado con los dos anteriores, permitiría retener mejor las propiedades mecánicas y el valor del material, aunque se sigue produciendo una degradación de las fibras obtenidas. Asimismo, permite tratar materiales mixtos y, por lo tanto, sería especialmente beneficioso para residuos de fin de vida.

No obstante, hoy en día todavía se produce una degradación importante de los compuestos, por lo que la tecnología necesita desarrollarse, encontrándose aún en fase de investigación [7].

Otra potencial desventaja de esta tecnología es el pequeño tamaño de las fibras resultantes, que limita el rango de posibles aplicaciones finales. La pirólisis y la pirólisis por microondas permiten recuperar fibras más largas y después cortarlas a diferentes tamaños para suministrar al mercado un mayor rango de productos para diferentes aplicaciones finales.

IV. EMPRESAS Y PROYECTOS

Tanto a nivel nacional como internacional, existen numerosas empresas e iniciativas que están desarrollando procesos de tratamiento térmico para materiales compuestos, muchos de ellos relacionados directamente con la industria eólica.

En España, ***Reciclalia*** ha sido una de las primeras empresas en prestar servicios de reciclaje térmico de materiales compuestos a nivel comercial. Esta empresa, una vez que la pala es desinstalada, lleva a cabo el procesado mecánico de la misma en un sistema automatizado y móvil en el propio parque eólico (Figura 26), para facilitar el traslado a sus instalaciones de reciclaje.

Figura 26: Mecanizado de las palas in-situ, para prepararlas para su posterior tratamiento térmico [33].

En el tratamiento térmico (pirólisis) se elimina la resina del material compuesto, degradando las propiedades de las fibras menos del 10%, lo que permite reutilizar el producto que se obtiene en aplicaciones no estructurales, como pueden ser paneles de aislamiento de las góndolas y en otros sectores donde se requieran fibras cortas [33].

El horno de pirólisis utilizado en esta planta de reciclaje (Figura 27) es un reactor horizontal de tres cámaras independientes (pirólisis, gasificación y enfriamiento) patentado por Reciclalia y fabricado por la empresa nacional **Efesto Green Reactors**.

Figura 27: Horno de pirólisis para realizar el reciclado térmico de las palas (Fuente: Reciclalia).

También a nivel nacional, ***bcircular TRC*** (Thermal Recycling of Composites), plataforma asociada al CSIC, se dedica al desarrollo de tecnologías relacionadas con el reciclado de materiales compuestos. Han desarrollado R3FIBER, un proceso que permite obtener fibras limpias tras someter al material compuesto a distintas curvas de calentamiento en atmósfera y temperatura controlada (Figura 28).

Figura 28: Fibra reciclada obtenida a partir de R3FIBER [34].

Estudios realizados por el CENIM-CSIC han concluido que estas fibras apenas sufren modificaciones en sus propiedades mecánicas. Se encuentran trabajando en fabricar nuevos materiales compuestos a través de fibra reciclada que puedan ser utilizados en otros sectores como la automoción o el industrial [34].

A nivel internacional, se pueden encontrar empresas como ***neocomp*** en Alemania o de ***Demacq Recycling*** en Holanda, dedicadas al reciclaje mecánico de materiales compuestos, entre ellos los residuos obtenidos del desmantelamiento de palas eólicas. El material reciclado obtenido en estos procesos es posteriormente reusado para realizar nuevos productos y aplicaciones, como el puente mostrado en la Figura 29 [35].

Figura 29: Puente fabricado a partir de materiales compuestos reciclados (Fuente: Demacq Recycling).

Por último, entre los proyectos a nivel internacional que se están llevando a cabo en el tema del reciclaje de palas destaca ***DecomBlades***.

DecomBlades

DECOMBLADES

Colaboradores

Objetivo

En DecomBlades se están investigando soluciones para reciclar el material compuesto de las palas de los aerogeneradores con el objetivo de sentar las bases para la comercialización de su reciclaje mediante soluciones sostenibles. Este proyecto de tres años de duración (2021-2023) se centrará en tres procesos vistos en este documento:

1. Triturado mecánico de palas de aerogeneradores de modo que el material se pueda reutilizar en diferentes productos y procesos;
2. Uso de material de pala triturado en la producción de cemento;
3. Pirólisis.

Web: *https://decomblades.dk/*

4.4.3. RECICLAJE QUÍMICO

I. SOLVÓLISIS

La solvólisis es un tratamiento químico por el cual se transforma un compuesto con consumo o generación de energía, basándose en una reacción de sustitución: un átomo o compuesto es reemplazado por otro utilizando un disolvente que actúa como nucleófilo, como puede ser el agua, el alcohol o un ácido.

En el caso de las palas de los aerogeneradores, los materiales compuestos pueden ser reciclados a través de este tipo de reacción utilizando el agua como disolvente que, bajo condiciones específicas, produce en la resina la despolimerización termoquímica. Este proceso provoca la ruptura de los enlaces en las resinas termoestables, permitiendo la separación de estas de las fibras de vidrio.

En el proceso, el material compuesto se mantiene en un lecho de partículas granuladas (como puede ser la arena), que es fluidizada usando una corriente de aire. Este se calienta y las partículas orgánicas se volatilizan, mientras los sólidos inorgánicos quedan como producto [36].

Comparado con otros procesos térmicos, la solvólisis requiere menores temperaturas de trabajo para lograr la degradación de las resinas, conllevando, por lo tanto, una menor degradación de las fibras. Además, el proceso puede ser escalado.

La solvólisis sigue teniendo inconvenientes, dado que actualmente se encuentra todavía en fase de investigación, lo que provoca que los costes de inversión y operación sean aún elevados, y requiere de un procesado posterior del disolvente utilizado.

II. PROYECTOS

El reciclado químico está siendo investigado y desarrollado por varias iniciativas, siendo una de las más interesantes el **proyecto CETEC** [37].

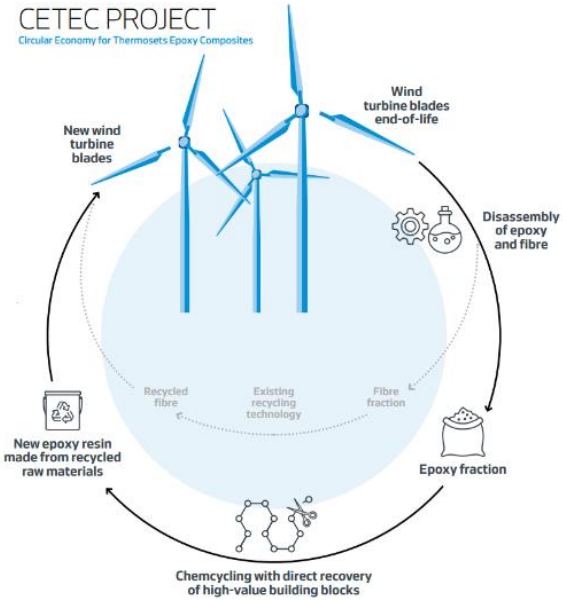
PROYECTO CETEC (Circular Economy for Thermosets Epoxy Composites)

Colaboradores

Objetivo

El proyecto CETEC busca desarrollar una nueva tecnología que permita aumentar la circularidad de las resinas epoxi termoestables, de las que están actualmente fabricadas las palas. El proyecto, comenzado en 2021 y con una duración prevista de 3 años, presentará una solución comercial lista para su implementación industrial.

El método de reciclaje a desarrollar consiste en la separación de la fibra y la resina epoxi en un proceso de *chemcycling* (reciclado químico de residuos plásticos), que disolverá las resinas en sus componentes base similares a los materiales vírgenes. Estos materiales podrán ser posteriormente reintroducidos en el proceso de fabricación de nuevas palas, logrando un recorrido circular para la resina.



4.5. RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

En caso de no poder recurrir al reciclaje del material de las palas, éstas pueden ser incineradas para recuperar energía. Es una solución sencilla, pero que tiene numerosas desventajas.

Entre ellas, los materiales compuestos utilizados para la estructura de la pala contienen hasta un 70% en peso de fibra, la cual no es combustible y dificulta el proceso [38], además de poder dañar los hornos y los conductos de los gases de combustión. Asimismo, este proceso deja como residuo grandes cantidades de cenizas, las cuales es necesario tratar.

4.6. NUEVAS PLANTAS DE PROCESAMIENTO DE RESIDUOS EÓLICOS

El creciente interés del sector eólico por la economía circular se manifiesta en el número de proyectos de plantas de reciclaje de palas de aerogenerador que están siendo publicados por diversas empresas para ser ejecutados en los próximos años. El objetivo de estas iniciativas es la recuperación de los materiales de las palas del aerogenerador y su reutilización en diversos sectores e industrias. Dentro de los anuncios públicos se encuentran:

- **Consorcio formado por Endesa, LM Wind Power y PreZero**. El proyecto contará con una inversión aproximada de 8,5 M€ para una nueva planta de reciclaje que será ubicada en Cubillos del Sil (León). Esta instalación estará operativa en 2024 y planea poder procesar 6.000 ton/año [39].
- **EnergyLOOP, empresa formada por Iberdrola y FCC Ámbito**, instalará en Navarra una planta de reciclaje de palas con una inversión de 10 M€. La iniciativa contará, además, con el apoyo de Siemens Gamesa [40].
- **Naturgy, junto con Ruralia**, pondrán en marcha una planta piloto de reciclaje integral de parques eólicos en Almazán [41].
- ***RenerCycle***, nueva sociedad creada por 18 empresas con el objetivo de liderar la actividad industrial en lo relativo al desmantelamiento de parques eólicos y al reacondicionamiento de sus principales componentes para su utilización en una segunda vida en el mercado de repuestos, e incluyendo el reciclaje de aquellas partes de las que se puede obtener materia prima, como las palas [42].

Esta ambición de la eólica es reforzada por los objetivos europeos y españoles de promover las iniciativas de economía circular, siendo los fondos del PRTR una herramienta fundamental para poder incentivar las repotenciaciones y crear una industria nacional alrededor del reciclaje de las palas de los aerogeneradores.

5. CONCLUSIONES Y PRÓXIMOS PASOS

En este documento se presentan diferentes soluciones existentes a día de hoy para avanzar hacia el objetivo del sector eólico de conseguir el mayor nivel de reciclabilidad posible de las palas de los aerogeneradores.

La necesidad del impulso y desarrollo de estas tecnologías viene motivada por los volúmenes de palas de aerogeneradores que serán desmanteladas en los próximos años debido a la antigüedad de un amplio número de los parques eólicos nacionales, muchos de los cuales serán repotenciados. A este desafío, en una escala menor, se llevan enfrentando las empresas de fabricación de palas desde hace años, las cuales encuentran grandes dificultades para reciclar los excedentes de fabricación.

Los principales problemas identificados son la dificultad para encontrar colaboradores para el reciclado de forma estable, y la inexistencia de figuras a nivel comercial que absorban el volumen generado y lo transformen en un nuevo producto (reciclado y reutilización).

Es importante tener en cuenta que los proyectos de economía circular que se desarrollen en el sector eólico deben contemplar la cadena de valor en su conjunto, desde el origen del residuo hasta el desarrollo del mercado de los productos resultantes.

Por ello, el primer paso es la reducción del volumen de residuos a generar, lo cual debe atajarse en las primeras etapas del ciclo de vida de las palas. De esta manera, para las futuras palas, nuevos diseños optimizados y la utilización de materiales reciclables para su fabricación permitirán lograr la circularidad de los materiales.

Para el caso de las palas eólicas ya instaladas, una vez utilizadas hasta el final de su vida útil, **existen múltiples soluciones para dotarlas de circularidad, pero todavía no están totalmente consolidadas a escala comercial**. Actualmente el procesado mecánico y la pirólisis son las tecnologías con mayor madurez para el reciclado de estos materiales.

El reciclado mecánico y la utilización del producto triturado en el co-procesamiento del cemento es la solución más desarrollada y la que mayor volumen de materiales compuestos puede tratar hoy en día. Para sacarle su máximo rendimiento, es necesario trabajar con las cementeras para que se pongan de manifiesto las ventajas de adaptar sus procesos a este tipo de materiales. El inconveniente de esta opción es la total pérdida de valor del material compuesto.

Por su parte, la pirólisis posee un gran potencial para convertirse en la tecnología de reciclaje principal para los materiales compuestos en los próximos años, con algunas

empresas comenzando a ofertar esta opción, aunque para ello requiera continuar su desarrollo y conseguir procesos a escala industrial.

Existen otras tecnologías de reciclado de materiales compuestos, como la fragmentación por pulsos de alta tensión, la pirólisis por microondas y la solvólisis, que se encuentran es sus primeras etapas de investigación y desarrollo, requiriendo todavía ser probadas en entornos industriales.

Para lograr que todas estas tecnologías se desarrollen hasta convertirse en soluciones viables económica y técnicamente a nivel comercial es necesario, además de aumentar la inversión en las mismas, lograr un caudal de residuos de materiales compuestos a reciclar estable. Dicho de otro modo, **es clave garantizar un flujo constante de materiales para consolidar tecnologías y reducir costes**.

Además de la necesidad de establecer un marco regulatorio claro y que incite y facilite el despliegue de las tecnologías de reciclaje, es vital la **colaboración con otros sectores que hacen un uso intensivo de materiales compuestos**, tanto de fibra de vidrio como de carbono, como es el caso del sector de la construcción, la aeronáutica, el sector del automóvil o el sector naval.

Asimismo, **es necesario asegurar una calidad uniforme en el producto obtenido del reciclado**, que permita su reintroducción en un nuevo proceso productivo, convirtiéndose en materia prima para la elaboración de nuevos elementos o materiales. Para ello, es necesario potenciar la I+D con socios que precisen la fibra de vidrio como materia prima (aglomerados, cerámicas, vidrio, aislantes, construcción, etc.) e impulsar la existencia de estos mercados que utilicen fibra reciclada y faciliten el flujo económico para poder cerrar el ciclo de la economía circular.

La consecución de la circularidad en el sector eólico requiere avanzar en la integración de diferentes actores que cubran toda la cadena de valor, desde la generación del residuo, hasta el producto final, generando un entramado de industria nacional que permita la escalabilidad industrial y comercial.

Para la consecución de esta meta, será fundamental el apoyo de la Administración en la estandarización de soluciones y consolidación del mercado, integrando materiales procedentes del reciclado de las palas, por ejemplo, en Pliegos de Condiciones.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] AEE, «El sector eólico pide que se eliminen en toda Europa los vertederos para palas de aerogeneradores,» 16 junio 2021. [En línea]. Available: https://aeeolica.org/el-sector-eolico-pide-que-se-eliminen-en-toda-europa-los-vertederos-para-palas-de-aerogeneradores/. [Último acceso: 03 noviembre 2022].

[2] ORE CATAPULT, «Sustainable Decommissioning: Wind Turbine Blade Recycling,» 2021.

[3] NREL, «2015 Cost of Wind Energy,» Denver, 2017.

[4] T. R. Fox, «Recycling wind turbine blade composite material as aggregate in concrete,» Iowa State University, Ames, Iowa, 2016.

[5] Life Refibre, «Layman's Report: Pavimentos asfálticos de alto valor añadido con fibra de vidrio procedente del reciclaje sostenible de las palas de aerogeneradores».

[6] L. Mishnaevsky, K. Branner, H. N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan y B. F. Sørensen, «Materials for Wind Turbine Blades: An Overview,» *Materials (Basel),* p. 11, 2017.

[7] WindEurope, «Accelerating Wind Turbine Blade Circularity,» 2020.

[8] K. Campbell-Johnston, W. J. Vermeulen, D. Reike y S. Brullo, «The Circular Economy and Cascading: Towards a Framework,» *Resources, Conservation & Recycling: X,* septiembre 2020.

[9] European Commission , «Preparing a Waste Prevention Programme,» 2012.

[10] D. F. Rothbarth, «Covestro,» 12 Agosto 2020. [En línea]. Available: https://www.covestro.com/press/covestro-goldwind-and-lz-blades-develop-worlds-first-642-meter-polyurethane-wind-turbine-blade/. [Último acceso: 20 Octubre 2020].

[11] Siemens Gamesa RE, «Siemens Gamesa presenta la primera pala reciclable del mundo, lista para su uso comercial offshore,» 7 septiembre 2021. [En línea]. Available: https://www.siemensgamesa.com/es-es/sala-de-prensa/2021/09/launch-world-first-recyclable-wind-turbine-blade. [Último acceso: 22 septiembre 2022].

[12] Siemens Gamesa RE, «Siemens Gamesa instala la primera pala reciclable del mundo,» 1 agosto 2022. [En línea]. Available: https://www.siemensgamesa.com/newsroom/2022/07/080122-siemens-gamesa-press-release-recycle-wind-blade-offshore-kaskasi-germany. [Último acceso: 22 septiembre 2022].

[13] E. S. C. Bernabéu, «Auditoría profunda de palas de aerogeneradores con SARP, la importancia del factor Bio,» Aracnocóptero,, 2017.

[14] BBI JU, «BIZENTE,» 2020. [En línea]. Available: https://www.bbi-europe.eu/projects/bizente. [Último acceso: 16 11 2020].

[15] BIZENTE, «BIZNETE,» 2020. [En línea]. Available: https://bizente.eu/. [Último acceso: 16 Noviembre 2020].

[16] GIEC, «Grupo Interplataformas de Economía Circular,» 2020. [En línea]. Available: https://www.giec.es/. [Último acceso: 17 Febrero 2021].

[17] REOLTEC, «Innovación en el Sector Eólico 2000-2020,» Madrid, 2020.

[18] SURUS, «SURUS,» 2020. [En línea]. Available: https://www.surusin.com/. [Último acceso: 20 Octubre 2020].

[19] Spares in Motion, «Spares in Motion,» 2020. [En línea]. Available: https://www.sparesinmotion.com/. [Último acceso: 20 Octubre 2020].

[20] Repowering Solutions, «Repowering Solutions,» 2020. [En línea]. Available: http://repoweringsolutions.com/productos/aerogeneradores_reacondicionados/index.htm. [Último acceso: 20 Octubre 2020].

[21] wind-turbine.com , «wind-turbine.com Global Market,» 2020. [En línea]. Available: https://wind-turbine.com/. [Último acceso: 20 Octubre 2020].

[22] R. Gentry, T. Al-Haddad, L. C. Bank, F. R. Arias y A. Nagle, «Structural Analysis of a Roof Extracted from a Wind Turbine,» *American Society of Civil Engineers,* 2020.

[23] SuperUse, «SuperUse,» 2021. [En línea]. Available: https://www.superuse-studios.com/. [Último acceso: 10 Noviembre 2021].

[24] Ecoalf, «Ecoalf,» 2021. [En línea]. Available: https://ecoalf.com/es/?_adin=02021864894. [Último acceso: 19 Febrero 2021].

[25] WindEurope, «How to Build a Circular Economy for Wind Turbine Blades through Policy and Partnerships,» WindEurope, Bruselas, 2020.

[26] REVE, «REVE,» 8 Diciembre 2020. [En línea]. Available: https://www.evwind.es/2020/12/08/ge-renewable-energy-announces-us-wind-turbine-blade-recycling-agreement-with-veolia/78446. [Último acceso: 7 Enero 2021].

[27] M. L. Nguyen, J. Blanc, J. P. Kerzreho y P. Hornych, «Review of glass fibre grid use for pavement reinforcement and APT experiments at IFSTTAR,» *Road Materials and Pavement Design,* 2013.

[28] Miljøskærm, «Miljøskærm,» 2020. [En línea]. Available: http://miljoskarm.dk/english/. [Último acceso: 20 Octubre 2020].

[29] LIFE+BRIO, «Desmantelamiento y Reciclaje de las Palas Eólicas,» 2017.

[30] I. Julián, A. García-Jiménez, A. Aguado, C. Arenal, A. Calero, V. Campos, G. Escobar, A. L. Buendía, D. Romero, E. Verdejo y N. García-Polanco, «Advances in the circularity of end-of-life fibre-reinforced polymers by microwave intensification,» *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification,* vol. 178, Agosto 2022.

[31] K. Kalkanis, C. Psomopoulos, S. Kaminaris, G. Ionnidis y P.Pachos, «Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability,» Athens, 2018.

[32] D. Akesson, Z. Foltynowicz, J. C. y M. Skrifvars, «Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines,» *Journal of Reinforced Plastics and Composites,* vol. 31, nº 17, 2012.

[33] Reciclalia, «Reciclalia,» 2017. [En línea]. Available: https://reciclaliacomposite.com/wordpress/. [Último acceso: 15 Octubre 2020].

[34] TRC, «bcircular,» 2016. [En línea]. Available: https://www.bcircular.com/es/. [Último acceso: 15 Octubre 2021].

[35] neocomp GmbH, «neocomp,» 2022. [En línea]. Available: https://www.neocomp.eu/. [Último acceso: 3 noviembre 2022].

[36] S. K. Gopalraj y T. Kärki, «A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis,» *SN Applied Sciences,* 2020.

[37] VESTAS, «New coalition of industry and academia to commercialise solution for full recyclability of wind turbine blades,» 17 mayo 2021. [En línea]. Available: https://www.vestas.com/en/media/company-news/2021/new-coalition-of-industry-and-academia-to-commercialise-c3347473. [Último acceso: 3 noviembre 2022].

[38] J. Beauson y P. Brøndsted, «Wind Turbine Blades: An End of Life,» de *MARE-WINT. New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology*, W. Ostachowicz, M. McGugan, J. Schröder-Hinrichs y M. Luczak, Edits., Springer Open, 2016.

[39] Endesa, «Endesa y PreZero España construirán la primera planta de reciclaje de palas eólicas de la Península Ibérica con el apoyo de GE Renewable Energy,» 31 enero 2022. [En línea]. Available: https://www.endesa.com/es/prensa/sala-de-prensa/noticias/eficiencia-energetica/economia-circular/primera-planta-reciclaje-palas-eolicas-peninsula-iberica. [Último acceso: 22 septiembre 2022].

[40] Iberdrola, «Iberdrola y FCC lanzan EnergyLOOP para liderar el reciclaje de palas de aerogeneradores,» 31 mayo 2022. [En línea]. Available: https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/iberdrola-y-fcc-lanzan-energyloop-para-liderar-el-reciclaje-de-palas-de-aerogeneradores. [Último acceso: 22 septiembre 2022].

[41] Naturgy, «Naturgy y Ruralia crean la primera empresa española para el reciclaje integral de parques eólicos,» 5 julio 2022. [En línea]. Available: https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/iberdrola-y-fcc-lanzan-energyloop-para-liderar-el-reciclaje-de-palas-de-aerogeneradores. [Último acceso: 22 septiembre 2022].

[42] RenerCycle, «Nace RenerCycle con el objetivo de ofrecer soluciones industriales de economía circular al sector renovable,» 20 septiembre 2022. [En línea]. Available: https://renercycle.com/nace-renercycle-con-el-objetivo-de-ofrecer-soluciones-industriales-de-economia-circular-al-sector-renovable%EF%BF%BC/. [Último acceso: 22 septiembre 2022].

[43] Red Eléctrica de España, «Borrador del Plan. Desarrollo de la red de transporte de energía eléctrica. Periodo 2021-2026.,» 2020.

[44] AEE, «Anuario Eólico 2020,» AEE, Madrid, 2020.

[45] AEE, «Eólica 06. Todos los datos, análisis y estadísticas del sector eólico,» AEE, Madrid, 2006.

[46] J. Unwin, «Tvindkraft – the oldest operating wind turbine in the world,» 13 8 2019. [En línea]. Available: https://www.power-technology.com/features/oldest-operating-wind-turbine-tvindkraft/.

[47] C. Martin, «Wind Turbine Blades Can't Be Recycled, So They're Piling Up in Landfills,» 5 2 2020. [En línea]. Available: https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills.

[48] S. Joncas, *Thermoplastic Composite Wind Turbine Blades: An Integrated Design Approach,* Delft: TU Delft, 2010.

[49] A. K. K. Matt, S. Strong, T. Elgammal y R. S. Amano, «Self-Healing Tubing in Wind Turbine Blades,» *Journal of Energy Resources Technology,* 2016.

[50] ARKEMA, «Elium® resins for composites,» 2020. [En línea]. Available: https://www.arkema.com/en/products/product-finder/range-viewer/Elium-resins-for-composites/. [Último acceso: 20 Octubre 2020].

[51] Dreamwind, «Dreamwind,» 2017. [En línea]. Available: http://www.dreamwind.dk/en/. [Último acceso: 14 10 2020].

[52] IRT Jules Verne, *Communiqué de Presse: L'IRT Jules Verne et un consortium d'acteursindustriels lancent le projet ZEBRA,* Nantes, 2020.

[53] J. P. Jensen, «GenVind. Experiences in managing composite waste for a more circular wind industry,» Madrid, 2017.

[54] Re-Wind, «Re-Wind. Design Atlas,» 2018.

[55] A. Alshannaq, D. Scott, L. Bank, M. Bermek y R. Gentry, «Structural Re-Use of De-Commissioned Wind Turbine Blades in Civil Engineering Applications,» 2019.

[56] neocomp GmbH, «neocomp,» 2020. [En línea]. Available: https://www.neocomp.eu/de/. [Último acceso: 15 Octubre 2020].

[57] Demacq Recycling, «DemacqRecycling,» 2020. [En línea]. Available: https://www.demacq.nl/en/. [Último acceso: 15 Octubre 2020].

[58] A. J. Nagle, E. L. Delaney, L. C. Bank y P. G. Leahy, «A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades,» *Journal of Cleaner Production,* 2020.

[59] CEWEP, «Landfill taxes and bans. Overview,» 2020.

[60] RDC Environment , «Étude Comparative de la Taxation de l'Élimination des Déchets en Europe,» ADEME, 2017.

[61] Coprocesamiento.org, «¿Qué es el Coprocesamiento?,» [En línea]. Available: https://coprocesamiento.org/coprocesamiento-es-una-buena-opcion/.

[62] G. Sieros, P. Chaviaropoulos, J. D. Sørensen, B. Bulder y P. Jamieson, «Upscaling Wind Turbines: theoretical and practical aspects and their impact on the cost of energy,» *Wind Energy,* vol. 15, nº 1, pp. 3-17, 2012.

[63] LM Wind Power, «'ZEBRA project' launched to develop first 100% recyclable wind turbine blades,» 2020. [En línea]. Available: https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/news-from-lm-places/zebra-project-launched. [Último acceso: 25 Octubre 2020].

[64] CompositesLab, «What Are Composites?,» 2020. [En línea]. Available: http://compositeslab.com/composites-101/what-are-composites/. [Último acceso: 27 Octubre 2020].

[65] Liftra, «Desmantelamiento de aerogeneradores y el reciclaje de componentes según los principios de sostenibilidad,» Madrid, 2017.

[66] Life Refibre, «Life Refibre,» 2020. [En línea]. Available: https://www.liferefibre.eu/. [Último acceso: 7 Enero 2021].

[67] Hill+Knowlton Strategies, «La Regulación en Materia de Residuos y Economía Circular en España,» Hill+Knowlton Strategies, 2021.

[68] AEROX, «Aerox. Advanced Polymers,» 2016. [En línea]. Available: https://www.aerox.es/. [Último acceso: 20 Octubre 2021].

[69] FiberEUse, «FiberEUse,» 2020. [En línea]. Available: http://fibereuse.eu/. [Último acceso: Octubre 19 2021].

[70] FSC, «FSC Bosques para Todos para Siempre,» 2021. [En línea]. Available: https://es.fsc.org/es-es. [Último acceso: 13 Agosto 2021].

[71] Iberdrola, «Iberdrola,» 31 mayo 2022. [En línea]. Available: https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/iberdrola-y-fcc-lanzan-energyloop-para-liderar-el-reciclaje-de-palas-de-aerogeneradores. [Último acceso: 22 septiembre 2022].

C/ Sor Ángela de la Cruz, 2. planta 14 D

28020, Madrid

Tel. +34 917 451 276

www.aeeolica.org