

## ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SECTOR EÓLICO PALAS DE AEROGENERADORES



---

INFORME ELABORADO POR LA ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA

NOVIEMBRE 2021

## ÍNDICE

|                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Antecedentes .....</b>                                                                      | <b>3</b>  |
| 1.1. <i>Datos de España .....</i>                                                                 | 4         |
| 1.2. <i>Repotenciación de Parques Eólicos .....</i>                                               | 5         |
| 1.3. <i>Excedentes de Fabricación .....</i>                                                       | 6         |
| 1.4. <i>Situación Actual y Problemática .....</i>                                                 | 8         |
| 1.5. <i>Contextualización del Problema.....</i>                                                   | 8         |
| 1.6. <i>Objetivo del Documento .....</i>                                                          | 10        |
| <b>2. Estructura y Materiales .....</b>                                                           | <b>11</b> |
| 2.1. <i>Fase Dispersa: Fibras .....</i>                                                           | 12        |
| 2.2. <i>Matriz.....</i>                                                                           | 13        |
| 2.3. <i>Otros Materiales .....</i>                                                                | 14        |
| 2.4. <i>Áreas de Investigación .....</i>                                                          | 16        |
| 2.5. <i>Estudio de Patentes .....</i>                                                             | 21        |
| <b>3. Regulación .....</b>                                                                        | <b>23</b> |
| 3.1. <i>Marco Europeo .....</i>                                                                   | 24        |
| 3.2. <i>Marco Nacional .....</i>                                                                  | 25        |
| 3.3. <i>Marco Autonómico .....</i>                                                                | 26        |
| <b>4. Posibles Soluciones.....</b>                                                                | <b>27</b> |
| 4.1. <i>Prevención de Residuos.....</i>                                                           | 27        |
| 4.1.1. <i>Extensión de Vida .....</i>                                                             | 28        |
| 4.1.2. <i>Disminución del uso de materiales y de la huella ambiental .....</i>                    | 28        |
| 4.1.3. <i>Diseño para reciclabilidad en la etapa fin de vida .....</i>                            | 29        |
| 4.1.4. <i>Mejora de la separación de componentes y materiales en la etapa de fin de vida.....</i> | 29        |
| 4.1.5. <i>Proyectos .....</i>                                                                     | 30        |

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>4.2. Rehabilitación .....</i>                           | <b>34</b> |
| <i>4.2.1. Evaluación Técnica de Extensión de Vida.....</i> | <b>34</b> |
| <i>4.2.2. Mercado de Palas Usadas .....</i>                | <b>35</b> |
| <i>4.3. Reutilización en usos distintos .....</i>          | <b>36</b> |
| <i>4.4. Reciclaje Material .....</i>                       | <b>38</b> |
| <i>4.4.1. Reciclaje Mecánico .....</i>                     | <b>39</b> |
| <i>4.4.2. Reciclaje Térmico.....</i>                       | <b>45</b> |
| <i>4.4.3. Reciclaje Químico .....</i>                      | <b>49</b> |
| <i>4.5. Recuperación de Energía .....</i>                  | <b>51</b> |
| <b>5. Conclusiones y Próximos pasos .....</b>              | <b>52</b> |
| <b>6. Bibliografía .....</b>                               | <b>54</b> |

## 1. ANTECEDENTES

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. De cara a los próximos años, y tal como establece el Plan Nacional de Energía y Clima (PNIEC), la energía eólica se convertirá en la primera tecnología del mix energético del sistema peninsular, tanto en potencia instalada como en cobertura de la demanda.

Al mismo tiempo, la primera generación de aerogeneradores está llegando al fin de su vida operativa. En los próximos años, muchos parques eólicos deberán optar entre extender la vida útil de sus activos, o llevar a cabo una repotenciación para sustituir los aerogeneradores antiguos por otros más modernos. La elección entre una u otra estrategia (extensión de vida vs. repotenciación) dependerá de múltiples factores que afectan el modelo de negocio de las instalaciones existentes, como es el estado de los aerogeneradores, la fiscalidad aplicable, el fin del régimen de incentivos o el desarrollo de mecanismos de apoyo específicos para repotenciación.

Además, el fin de la vida útil de un parque eólico no es la única razón para llevar a cabo su desmantelamiento, existiendo otras motivaciones como son los cambios regulatorios y normativos, y los cambios tarifarios que pueden conducir a esta solución, lo que puede incrementar el número de aerogeneradores con potencial de ser desmantelados.



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

Una vez desinstalado, actualmente es viable reciclar o reutilizar hasta el 83% de los materiales de un aerogenerador (acero, cobre y aluminio), y constituye una práctica habitual el aprovechamiento de muchos sus componentes como piezas de repuesto, como puede ser el caso de la torre, la multiplicadora y la góndola.

La composición de los elementos de un aerogenerador se refleja de forma simplificada en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición de los elementos de un aerogenerador (Fox, 2016) (Life Refibre, s.f.).

| Componente/<br>Material (% de peso) | Hormigón | Acero | Aluminio | Cobre | Materiales<br>Compuestos | Otros |
|-------------------------------------|----------|-------|----------|-------|--------------------------|-------|
| <b>Rotor</b>                        |          |       |          |       |                          |       |
| Buje                                |          | 100%  |          |       |                          |       |
| Palas                               |          | 3%    |          |       | 67%                      | 30%   |
| <b>Góndola</b>                      |          |       |          |       |                          |       |
| Multiplicadora                      |          | 96%   | 2%       | 2%    |                          |       |
| Generador                           |          | 65%   |          | 35%   |                          |       |
| Marco, Maquinaria,<br>Otros         |          | 84%   | 9%       | 4%    | 3%                       |       |
| <b>Torre</b>                        | 2%       | 98%   |          |       |                          |       |

Con el objetivo de conseguir una reciclabilidad o reutilización de la totalidad de las máquinas, el sector eólico continúa trabajando en el desarrollo de soluciones que permitan avanzar hacia el aprovechamiento completo de los componentes de un aerogenerador, siendo los materiales compuestos, de los que están fundamentalmente fabricadas las palas, una de las principales líneas de investigación dentro del sector.

Por tanto, dentro de la eólica, un objetivo de vital importancia es lograr implementar prácticas de economía circular en el ciclo de vida de las palas de manera que se llegue a conseguir que el material de las palas desmanteladas pueda ser de manera continua recirculado y reusado.

## 1.1. DATOS DE ESPAÑA

A cierre de 2020, en España había **1.203 parques eólicos** en más de 800 municipios, con **20.940 aerogeneradores** y **62.820 palas instalados** (AEE, 2020).

De los 20.940 aerogeneradores que están instalados en España, un **36%** (unos 7.500) se instalaron antes de 2005 y, por lo tanto, tienen 15 años o más (AEE, 2006). Considerando que la vida de diseño de un parque eólico y sus componentes es de 20 años, esto supone que más de 20.000 palas serán desinstaladas en los próximos años, aunque sólo las más

deterioradas sean desechadas al final de su vida de diseño, ya que la tendencia natural es la extensión de vida de los parques eólicos.

Realizando un análisis más detallado y teniendo en cuenta los distintos tamaños, y, por lo tanto, peso de las palas de los modelos de aerogeneradores instalados en España, se obtiene que en 2020 había un total de **256.229 toneladas** de palas en operación. De estas, 15.348 toneladas están instaladas en aerogeneradores de más de 20 años.

En la Tabla 2 se pueden observar en detalle los volúmenes de palas instaladas en toneladas a cierre de 2020 y que en los próximos años se irán acercando al final de su vida útil.

Tabla 2: Toneladas de palas que irán llegando al final de su vida de diseño en España entre 2021 y 2025 (Fuente: AEE).

| Edad       | TONELADAS PALAS SITUACIÓN ACTUAL |         |         |        |        |
|------------|----------------------------------|---------|---------|--------|--------|
|            | 2021                             | 2022    | 2023    | 2024   | 2025   |
| >20 Años   | 15.348                           | 23.376  | 34.637  | 43.607 | 63.255 |
| 18-20 Años | 28.259                           | 39.879  | 44.786  | 51.188 | 67.961 |
| 15-17 Años | 51.188                           | 67.961  | 68.141  | 78.337 | 58.166 |
| <15 Años   | 161.433                          | 125.012 | 108.664 | 83.096 | 66.847 |



Figura 2: Desinstalación de una pala (Liftra, 2017).

## 1.2. REPOTENCIACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

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 se verán reemplazadas por otras más modernas.

Las repotenciaciones pueden verse impulsadas por distintas iniciativas gubernamentales, tales como el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) o subastas de renovables que incluyan repotenciación.

Incluyendo esta variable, se puede llevar a cabo un análisis en el cual se plantea un escenario donde en los próximos 5 años se repotenciará:

- El 100 % de los parques eólicos de más de 20 años,
- El 50 % de las instalaciones de entre 18 y 20 años,
- El 25 % de los parques de entre 15 y 17 años.

A partir de esta hipótesis, se obtienen los volúmenes por año mostrados en la Tabla 3, donde en la última fila se muestra el total de palas que sería desmantelado cada año debido a la repotenciación o desmantelamiento de los parques.

Tabla 3: Volumen de palas con potencial de ser desmantelados por repotenciaciones y fin de vida entre 2021 y 2025 desagregados por su vida de operación (Fuente: AEE).

| Edad               | 2021   | 2022   | 2023   | 2024   | 2025   | Total   |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| <b>&gt;20 Años</b> | 15.348 | 4.014  | 2.815  | 1.121  | 1.842  |         |
| <b>20 Años</b>     | 8.028  | 5.631  | 2.242  | 3.684  | 2.274  |         |
| <b>19 Años</b>     | 11.261 | 4.485  | 7.368  | 4.547  | 3.243  |         |
| <b>18 Años</b>     | 8.969  | 14.736 | 9.094  | 6.485  | 15.365 |         |
| <b>17 Años</b>     | 19.649 | 12.126 | 8.647  | 20.487 | 9.196  |         |
| <b>16 Años</b>     | 16.168 | 11.529 | 27.316 | 12.261 | 19.176 |         |
| <b>15 Años</b>     | 15.372 | 36.421 | 16.348 | 25.568 | 16.250 |         |
| <b>Ton Palas</b>   | 42.275 | 31.459 | 25.245 | 23.058 | 23.438 | 145.475 |

En total, entre 2021 y 2025 se desmantelarán 145.475 toneladas de palas de aerogeneradores las cuales, asumiendo que tienen un contenido de materiales compuestos del 67 % en peso, suponen 97.468 toneladas de materiales compuestos.

### 1.3. EXCEDENTES DE FABRICACIÓN

En los análisis anteriores no se tienen en cuenta los residuos de materiales compuestos que son consecuencia del proceso de fabricación de las palas. Estos residuos generan un suministro continuo que garantiza un volumen mínimo de materiales a procesar. Sin embargo, no se han obtenido datos para incluirlos en el análisis realizado.

En España existen varias fábricas de palas de diferentes fabricantes. En el proceso productivo, siendo una de las principales materias primas la fibra de vidrio, se generan cantidades significativas de residuo debido a los recortes de las telas, los rollos de tela y

las palas scrap (no conformes). Estos excedentes de fabricación están motivados por el diseño de la pala y los exigentes requisitos de calidad.



Figura 3: Fabrica de palas de Acciona en Lumbier (Fuente: Diario de Navarra).

A pesar del compromiso de los fabricantes para conseguir el reciclado de sus residuos, y tal como se desarrollará a lo largo del documento, estos se están encontrando con importantes dificultades para encontrar colaboradores de servicio para el reciclado de la fibra de forma estable.

Entre los problemas que destacan las empresas de fabricación de palas para lograr el reciclado de la totalidad de sus residuos se encuentran:

- Inexistencia de una figura a nivel comercial que absorba el volumen generado en el proceso de fabricación y lo transforme en subproducto (reciclado y reutilización).
- Proveedores situados a grandes distancias del lugar de generación de los residuos, lo que supone una penalización en exceso sobre el coste del transporte.

- Los fabricantes de palas no se son empresas dedicadas al negocio del residuo, por lo que precisan de socios para una gestión sostenible.
- Se requieren inversiones estructurales para garantizar el buen estado de la fibra hasta su retirada (seca y limpia).
- Las plantas de tratamiento y recuperación existentes cuentan con espacios limitados para albergar el residuo generado.
- Los suministros de fibra se realizan en rollos de dimensiones estándar, los cuales no se adecuan a la geometría de pala.

#### 1.4. SITUACIÓN ACTUAL Y PROBLEMÁTICA

Hasta el momento, la retirada de palas suele ser consecuencia de algún siniestro fortuito, como la caída de un rayo, y las palas dañadas se reparan siempre que es posible. Para estas ocasiones, los fabricantes y las empresas de mantenimiento cuentan con almacenes controlados de palas para su reposición o reparación.

Dado que la reparación no siempre es posible, se hace necesario recurrir a técnicas de gestión de residuos. Sin embargo, estas soluciones cuentan actualmente con varios problemas, siendo los principales la dificultad para encontrar colaboradores para el reciclado de forma estable, y la inexistencia de una figura a nivel comercial que absorba el volumen generado y lo transforme en un subproducto (reciclado y reutilización).

Así, por ejemplo, una de las utilizadas actualmente, es el triturado de las palas para que el material compuesto sea utilizado como materia prima en la fabricación del cemento. Sin embargo, esto supone una pérdida importante en el valor del material y desaprovechar sus excelentes propiedades mecánicas, por lo que se están investigando y desarrollando tecnologías y materiales que permitan la recuperación del material con la menor degradación posible.

#### 1.5. CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

A pesar de los números presentados y la importancia que el sector eólico le da a conseguir el desarrollo de soluciones para el fin de vida de las palas para avanzar en el objetivo de lograr ser un sector completamente circular, es necesario contextualizar el problema para comprender su alcance y tamaño.

Es decir, se ha presentado que en un escenario donde se impulse la repotenciación, se requerirá el reciclaje de 145.475 toneladas de palas en los próximos 5 años, 29.095 toneladas por año.

En España se reciclaron 1,5 millones de toneladas de envases en 2019, siendo la tasa de reciclaje de alrededor del 50% (objetivo de la UE), lo que quiere decir que otros 1,5 millones de toneladas de envases fueron enviadas a vertederos o se incineraron.

El peso de todas las palas a reciclar durante un año representa menos del 1% del peso del total de envases y menos del 2% del peso del total de envases no reciclados. A esto hay que sumar que las palas de los aerogeneradores no son tóxicas y no producen lixiviados que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente, como sí ocurre con otros muchos productos que se desechan al vertedero y acaban generando contaminación de acuíferos y aguas subterráneas.

No obstante, las empresas del sector eólico están decididas a contribuir a que ese pequeño porcentaje pueda ser reciclado y contribuir de esta manera a la economía circular.



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

## 1.6. OBJETIVO DEL DOCUMENTO

La eólica lleva en su ADN el cuidado del medioambiente e intenta ser escrupulosa con su impacto medioambiental, persiguiendo la neutralidad climática a medio plazo.

En esta línea, el objetivo del documento es presentar el estado del arte actual de las estrategias de economía circular aplicables a palas eólicas, teniendo en cuenta aspectos como la composición de los materiales, la legislación vigente, las principales tecnologías y las aplicaciones para su reutilización y reciclaje, tanto las ya implementadas a día de hoy, como las que se encuentran en fase de investigación y desarrollo.

## 2. ESTRUCTURA Y MATERIALES

En una pala eólica se puede distinguir la parte del núcleo, que es la estructura central resistente, y la sección aerodinámica (Figura 5).

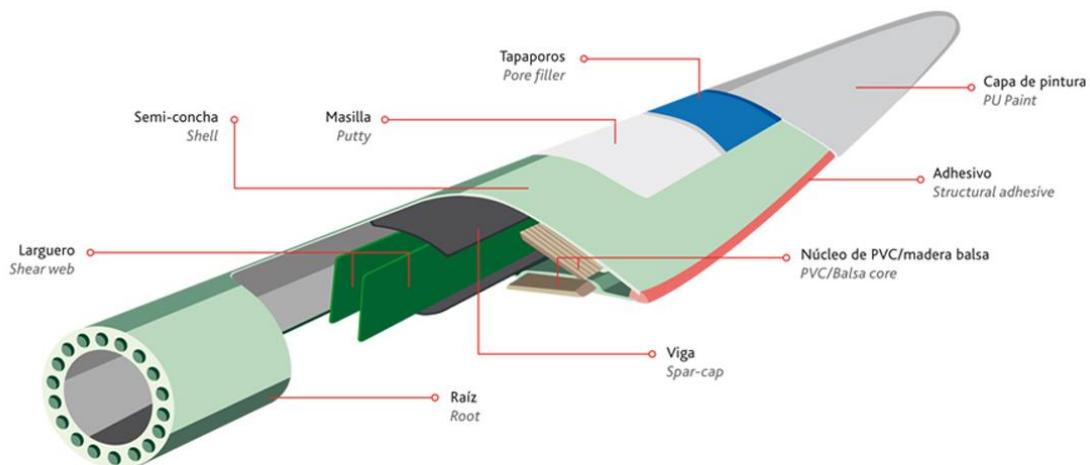


Figura 5: Componentes principales de una pala (Fuente: Acciona).

Los materiales usados para ellas son principalmente materiales compuestos (fundamentalmente la fibra de vidrio o carbono y resinas, difíciles de separar), con diferentes propiedades, que permiten optimizar el diseño de los aerogeneradores mediante la fabricación de palas livianas y de gran longitud, 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 conseguidas para las máquinas 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. Los materiales compuestos tienen propiedades mecánicas superiores, como mayor resistencia y menor peso, comparados con la mayor parte de los metales y sus aleaciones, por lo que son utilizados en numerosas aplicaciones estructurales en diversos sectores.

Los materiales compuestos tienen dos fases, como se muestra en la Figura 6, aunque luego se pueden añadir también aditivos que mejoren las propiedades del material:

- **Fase Matricial.** Fase principal, la cual posee un carácter continuo y 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 de refuerzo, lo que requiere una adhesión total entre el refuerzo y la matriz.
- **Fase Dispersa.** Fase de refuerzo, la cual aporta al material compuesto las propiedades mecánicas resistentes, y determinando la rigidez del mismo. 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.



Figura 6: Materiales Compuestos (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.

Dado que al aumentar el volumen en contenido de fibras se aumentan las propiedades mecánicas, los materiales compuestos para palas eólicas contienen hasta un 75% en peso de fibra de vidrio (Mishnaevsky, et al., 2017), aunque siempre con atención al peso total.

Las palas 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. Las fibras de vidrio tienen como principales características 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 de longitud, y, por lo tanto, su peso incrementa exponencialmente<sup>1</sup>, se ha comenzado a sustituir la fibra de vidrio 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 de materiales compuestos generalmente más desarrolladas y poseer mayor viabilidad económica para estos materiales. Sin embargo, los PRFC también cuentan con varias desventajas, entre las que se incluye su baja tolerancia a los daños, su conductividad eléctrica, que le hace más ser más propenso a la caída de rayos, y su mayor coste (Mishnaevsky, et al., 2017).

## 2.2. MATRIZ

Como matriz de los materiales compuestos utilizados se utilizan principalmente resinas termoestables (epoxis, poliésteres y ésteres de vinilo), las cuales dominan el mercado de los polímeros reforzados representando alrededor del 80% de este (Joncas, 2010), y las resinas termoplásticas.

Las **resinas termoestables** son aquellas resinas 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 los utilizados para la fabricación de palas. Sin embargo, su desventaja más importante es su difícil reciclado.

---

<sup>1</sup> El peso de la pala aumenta con el cubo de la longitud (Regla del Cubo), mientras que la producción de energía aumenta con el cuadrado de la misma (Sieros, et al., 2012).

Las **resinas termoplásticas** son materiales que, a altas temperaturas pueden ser fundidos permitiendo su moldeado, mientras que se endurecen a bajas temperaturas. Tienen como ventaja principal su mayor reciclabilidad. No obstante, al requerir mayores temperaturas de curado conllevan un mayor consumo energético y la posibilidad de afectar las propiedades de las fibras. Además, tienen como inconveniente añadido la dificultad de fabricar piezas de gran tamaño debido a su mayor viscosidad, factores que dificultan su utilización para la fabricación de palas.

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

### 2.3. OTROS MATERIALES

Además de los materiales compuestos, una pala eólica también tiene, en menor proporción, otros materiales como el PVC, los *gelcoats*, madera de balsa, poliuretanos y revestimientos superficiales y pinturas, en función del fabricante.



Figura 7: Las palas son generalmente fabricadas a partir de materiales compuestos PRFV con resinas termoestables (Autor: R. Andrés).

La madera de balsa es un material importante al ser muy ligero, adaptable y con buenas cualidades mecánicas, lo que supone que sea demandado 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 con fertilizantes u otros medios, lo que hace que pueda ser cultivado de manera sostenible.

Los fabricantes de palas del sector eólico tienen especial cuidado en garantizar la procedencia de la madera de balsa y exigen trabajar con empresas reconocidas y en posesión de certificaciones de calidad, sostenibilidad y trazabilidad. El objetivo del sector eólico español es adquirir madera de balsa procedente de bosques y plantaciones gestionados según estrictos estándares internacionales de sostenibilidad.

La madera de balsa utilizada en la fabricación de las palas de los aerogeneradores en España procede de plantaciones que cuentan con la certificación FSC (Forest Stewardship Council) o equivalente 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. El proveedor tiene sus propias plantaciones donde controlan todo el proceso, desde la plantación hasta su tala (ciclo de unos 4 años) para proceso y entrega a la fábrica, momento en el que replantan. Por tanto, **es un proceso autosostenible, controlado y certificado, que en ningún momento contribuye a deforestar bosques en los países mencionados.**

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 8).

A pesar de esto, la madera de balsa está cayendo en desuso en la fabricación de palas, usándose principalmente en los



The mark of  
responsible forestry

Figura 8: Certificación de Gestión Forestal de FSC, utilizada por los fabricantes de palas para conocer el origen de la madera de balsa utilizada (Fuente: FSC).

modelos de mayor antigüedad y esperándose que pueda ser completamente sustituida en los próximos años por plástico PET y PVC.

#### 2.4. ÁREAS DE INVESTIGACIÓN

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

En la Tabla 4 se resumen las áreas activas en cuanto a investigación de materiales para las palas de los aerogeneradores.

Tabla 4: Áreas activas en cuanto a investigación de materiales para los aerogeneradores (WindEurope, 2020).

|                         | 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, mayor ratio de conversión.                                       |
| 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, mayor ratio de conversión.                                       |
|                         | Promover procesos de fabricación eficientes a nivel de costes y consumo energético para los materiales compuestos reforzados con fibra de carbono, dado que con este material se consiguen mejores propiedades mecánicas. Como beneficio secundario, es también más atractivo económicamente el recuperar la fibra de carbono que el recuperar la fibra de vidrio. | Permitir la fabricación de palas de mayor tamaño y, por lo tanto, conseguir mayor ratio de conversión. |
| 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.                                                                                                                                                                       | Permitir la fabricación de palas de mayor tamaño y, por lo tanto, conseguir mayor ratio de conversión. |

|  |                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                 |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | 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, mayor ratio de conversión.                                                                                                |
|  | 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, una 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                                                                                               |

Así, a modo de ejemplo de los avances tecnológicos que se están llevando a cabo en este área, en 2020, Covestro junto con 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. En la actualidad, se están llevando a cabo pruebas de fatiga estática y dinámica para evaluar su durabilidad antes de comenzar su producción a pequeña escala. Este tipo de material permitiría la fabricación de palas de mayor longitud y resistencia por sus mejores características mecánicas, comparados con la resina epoxi. Además, supondría una reducción de costes en la fabricación de palas para aerogeneradores (Rothbarth, 2020).



Figura 9: La investigación sigue siendo vital para la implementación de estrategias de economía circular en la eólica (Autor: A. Martínez)

Otro ejemplo de línea de investigación que puede ser desarrollada en el futuro es la biodegradación de las palas. En un estudio llevado a cabo por Arbórea Intellbird y Innovagenomics, 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. Esto abre la posibilidad de investigar tecnologías que permitan el bioprocесamiento de las palas (C. Bernabéu, 2017).

La investigación y desarrollo de nuevos materiales para aplicaciones estructurales y la preocupación por su reciclaje o reutilización no es exclusiva del sector eólico. La aeronáutica, la automoción y la construcción, sectores que también hacen un uso importante 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 para encontrar nuevas soluciones. Por ejemplo, en el sector aeronáutico se observa como 12.000 aeronaves están acercándose a su fin de vida útil, lo que supondrá un gran incremento de los residuos de materiales compuestos en los próximos años (BBI JU, 2020).

Entre los proyectos específicos que están llevándose a cabo en otros sectores, el centro tecnológico Aitiip, en Zaragoza, está coordinando el proyecto **BIZENTE**, financiado con fondos europeos, cuyo fin es desarrollar una tecnología que permita la degradación de materiales compuestos termoestables que solucione sus problemas de fin de vida (BIZENTE, 2020).

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.

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 (GIEC, 2020).



## BIZENTE

### *Colaboradores*



### **Objetivo**

El proyecto BIZENTE tiene como objetivo 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 el problema de fin de vida de estos materiales.

Para ello, desarrollarán una tecnología enzimática biodegradable que, tras ser probada satisfactoriamente en un entorno de laboratorio, se ensayarán 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 mayo de 2020 y tendrá una duración de 4 años, hasta 2024, contando con una financiación total de 2,5 millones de €.

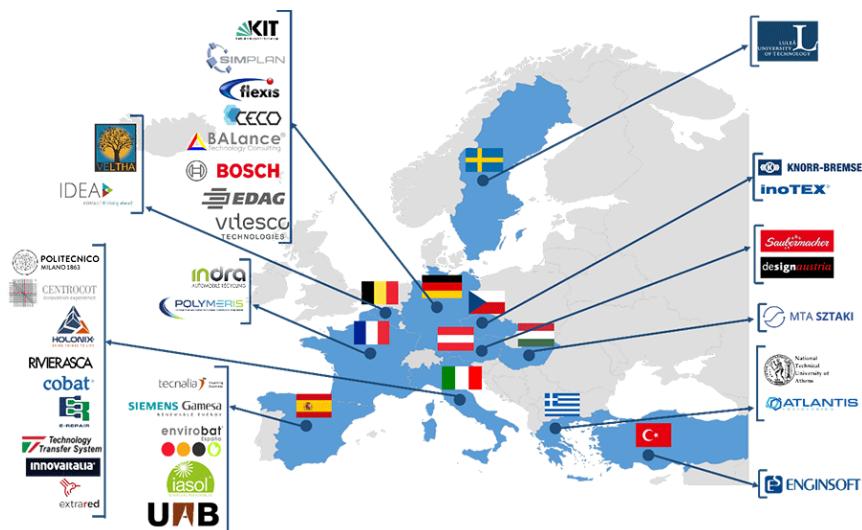
### **Web**

<https://bizente.eu/>



**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, que cubren diferentes sectores industriales europeos (automotriz, energías renovables, electrónica, textil, construcción), y por pilotos adicionales en nuevos sectores.

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

*Web*

<https://www.digiprime.eu/project/>

## 2.5. ESTUDIO DE PATENTES

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 último 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 puede observar en el Gráfico 1.

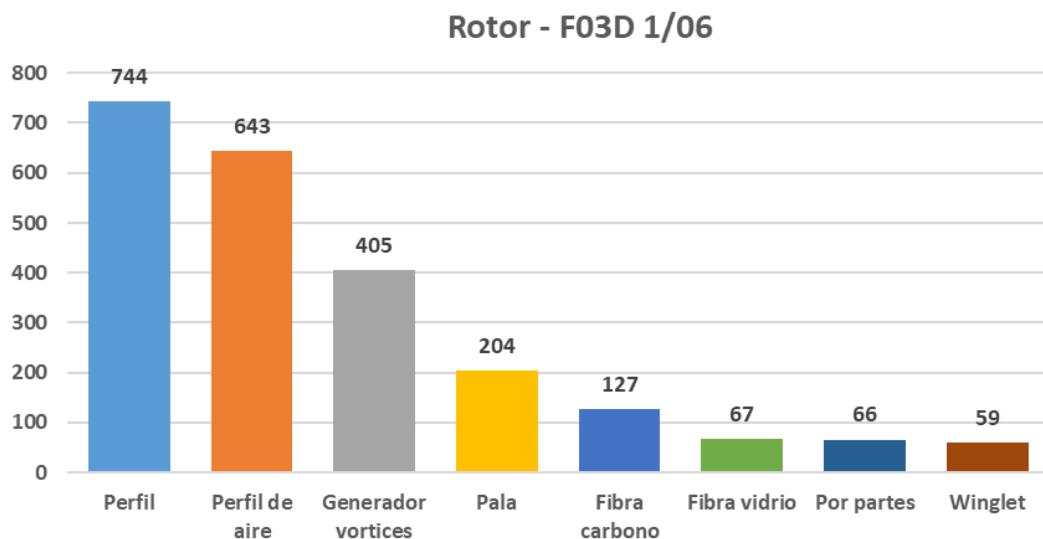


Gráfico 1: Distribución de patentes por temas (REOLTEC, 2020).

Las principales temáticas identificadas en dichas patentes son:

- **Perfil (foil):** desarrollo de nuevos perfiles en las palas.
- **Perfiles de viento (airfoil):** perfiles específicos de viento, desarrollos no válidos para otros fluidos.
- **Generador de vórtices (vortex generator):** accesorios y rugosidades incorporados a las palas para retrasar el desprendimiento de la capa límite y optimizar su rendimiento aerodinámico.
- **Pala (blade):** aspectos estructurales y aerodinámicos como la torsión, componentes internos y compuestos de fabricación.
- **Fibra de carbono (carbon fiber):** material de fabricación.
- **Fibra de vidrio (glass fiber):** material de fabricación.

- **Pala por partes (*segmented blade*):** fabricación de las palas en diferentes segmentos para facilitar el transporte.
- **Dispositivo de punta de la pala (*winglet*):** dispositivo ubicado en la punta de la pala con el objetivo de aumentar la eficiencia aerodinámica

Del análisis de patentes se puede deducir que los principales aspectos en estudio se orientan actualmente a la reducción de cargas en las palas y a la mejora de la captura de energía, a partir de generadores de vórtices y los winglets. También a la construcción de la pala por segmentos, de cara a facilitar el transporte hasta el emplazamiento del parque eólico, y la problemática asociada con el incremento del tamaño de rotor, siendo en algunas ocasiones el factor limitante para la potencia de una máquina la disponibilidad de una infraestructura de transporte (REOLTEC, 2020). En este sentido, se puede apreciar un mayor interés en la investigación de palas de fibra de carbono, las cuales doblan en número de patentes a las de fibra de vidrio.

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.

### 3. REGULACIÓN

En esta sección se presenta las normativas regulatorias a nivel europeo y nacional existentes en materia de residuos y economía circular para los materiales compuestos y, en especial, para las palas eólicas.

Debido a que el desmantelamiento de parques eólicos es todavía anecdótico, las normativas existentes están poco desarrolladas, por lo que no existen normativas armonizadas y las nacionales varían entre países.

Desde la perspectiva de la normativa vigente estatal y comunitaria, sólo han de considerarse residuos las palas eólicas que los titulares de las instalaciones eólicas desechen o tengan la intención de desechar, no las que vayan a ser objeto de reparación.

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, aprobada por la Administración competente para la autorización del parque eólico.

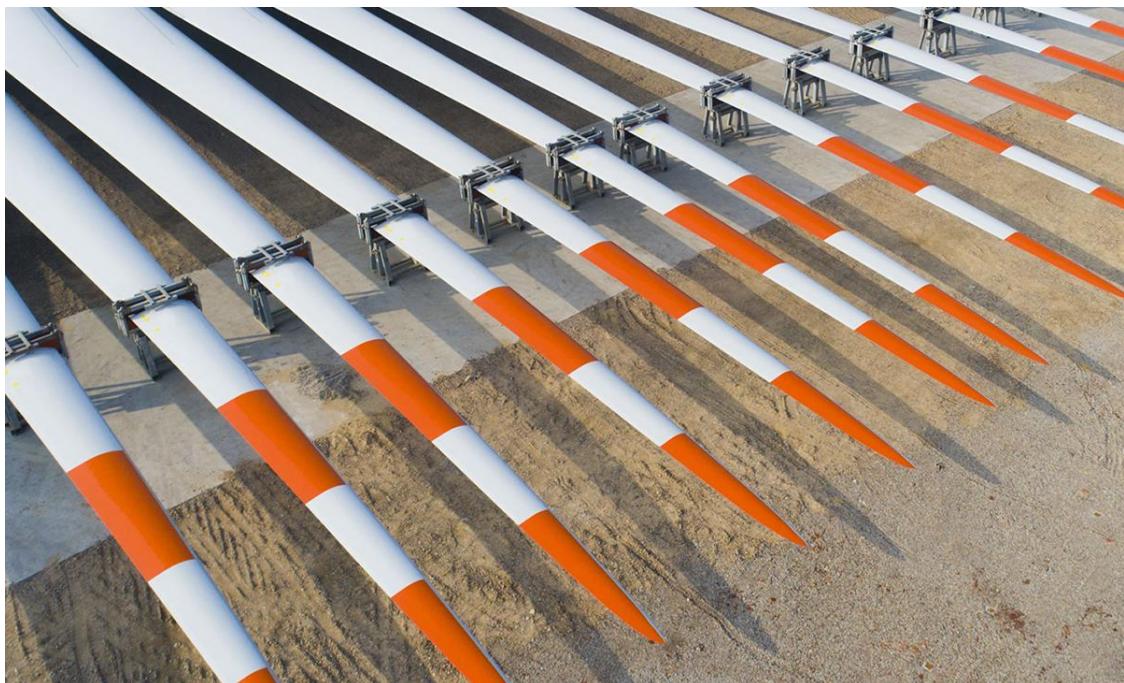


Figura 10: Las normativas existentes para tratar a las palas desmanteladas están poco desarrolladas (Fuente: WindEurope).

### 3.1. MARCO EUROPEO

La Comisión Europea adoptó en 2020 un nuevo **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.). Sin embargo, no propone medidas específicas para los materiales compuestos.

Por otro lado, de acuerdo con la normativa europea, los materiales compuestos se engloban dentro de los residuos plásticos de construcción y demolición, con código LER 17 02 03. El **código LER** se refiere a la Lista Europea de Residuos aprobada por la Decisión 2000/532/CE de la Comisión, de 3 de mayo de 2000. No obstante, existen pocos requisitos a nivel europeo para residuos de materiales compuestos (WindEurope, 2020).

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 toda Europa del traslado a vertedero para 2025 de las palas de aerogeneradores desmantelados. La industria eólica europea, de esta manera, se ha comprometido activamente a reutilizar, reciclar o recuperar el 100% de las palas desmanteladas.



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

### 3.2. MARCO NACIONAL

A nivel nacional, en 2020 se aprobó la **Estrategia Española de Economía Circular, 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 concreten medidas. Así, en mayo de 2021 se publicaba el I Plan de Acción de Economía Circular 2021-2023, dentro del cual se encontraban dos medidas específicas para la eólica:

- 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.
- Proyectos de I+D+i incentivadores de soluciones de EC para las palas de los aerogeneradores eólicos.

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

Desde el punto de vista de normativa en materia de residuos, en España existe la **Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados**. Asimismo, se publicó en el **Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, que complementa la legislación nacional sobre vertederos de la Ley 22/2011**. Su objetivo principal 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 mayo de 2021, el Consejo de Ministros emitía a las Cortes el **Proyecto de Ley de Residuos y Suelos Contaminados**, que servirá para revisar la normativa de 2011 para cumplir con los objetivos establecidos por la Unión Europea. Esta Ley estará en línea con la **Estrategia Española de Economía Circular 2030**, recogiendo restricciones sobre los plásticos de un solo uso, prevención en la generación de residuos, etc.

Aunque a priori no se prevén medidas específicas para los materiales compuestos, esta ley reforzará 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 armonizará un impuesto sobre el depósito de residuos en vertederos, la incineración y la co-incineración de residuos.

### 3.3. MARCO AUTONÓMICO

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

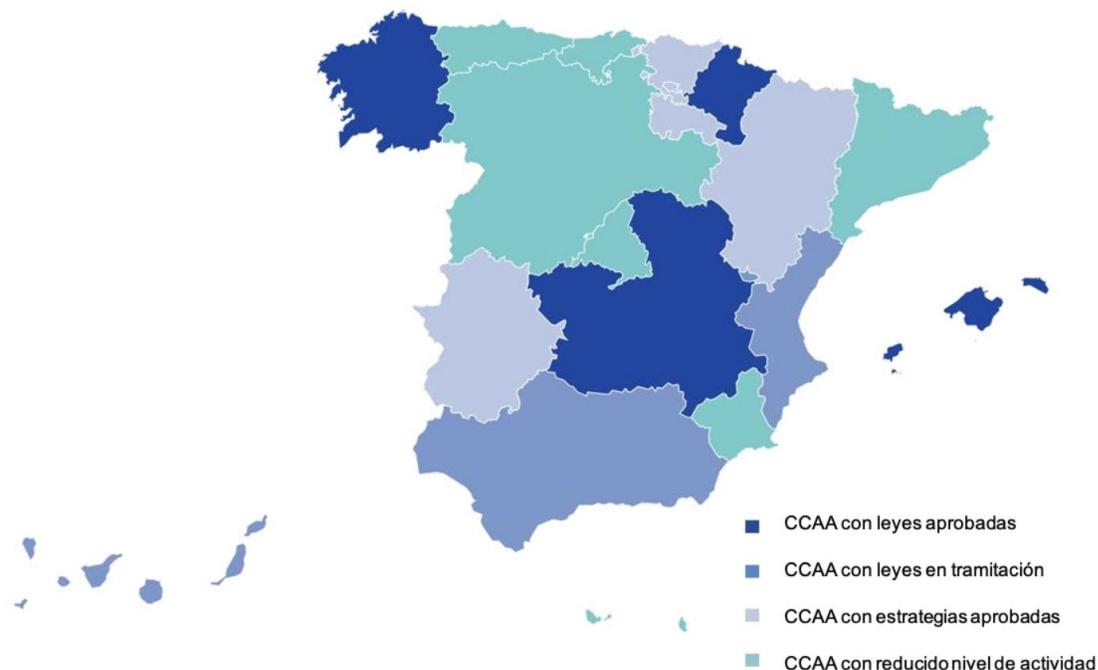


Figura 12: Situación normativa a nivel autonómico (Hill+Knowlton Strategies, 2021)

Así, por ejemplo, en Castilla-La Mancha se aprobó *Ley 7/2019, de 29 de noviembre, de Economía Circular* que busca, entre otros objetivos, promover un desarrollo económico sostenible en la región, reducir la generación de residuos y promover la valorización de los residuos como fuente de materias primas secundarias y desincentivar la generación de residuos que no puedan ser valorizables o integrados en el ciclo productivo. Posteriormente, en 2020 se constituyó la Comisión de Coordinación de Economía Circular de Castilla-La Mancha encargada de coordinar la estrategia para avanzar hacia un desarrollo económico sostenible.

## 4. POSIBLES SOLUCIONES

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 (Figura 13).



Figura 13: Jerarquía de Residuos establecida por la UE.

Según la misma, 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 como últimas alternativas.

### 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 estos tres objetivos, complementarios entre sí (European Commission , 2012):

- Reducción del material utilizado en la fabricación, lo que supondrá un menor volumen de residuos y de materiales a reciclar;
- Aumento en la eficiencia de los productos fabricados, que impliquen una menor tasa de fallo y un alargamiento de la vida útil de las palas;
- Sustitución de materiales tóxicos o difíciles de reciclar por otros más ecológicos.

La naturaleza de los materiales compuestos usados para la fabricación de las palas hoy en día (principalmente espumas, resinas y fibras de vidrio) implica que sean no-degradables y, por tanto, que su reciclaje no sea sencillo. Esto pone de manifiesto la importancia de esta etapa de la gestión de residuos en el desarrollo y fabricación de palas eólicas.

Entre las distintas tecnologías e iniciativas para la prevención de los residuos se encuentran la extensión de vida de las palas, la disminución de los materiales utilizados para su fabricación, el diseño para permitir su reciclaje, y la mejora de la separación de los componentes y materiales.

---

#### 4.1.1. EXTENSIÓN DE VIDA

Entre las soluciones que están siendo analizadas y desarrolladas:

1. Polímeros autorreparables. Materiales que requieren un mantenimiento mínimo y que subsanan sus microgrietas y roturas. Todavía se encuentran en fase de investigación (Matt, et al., 2016).
2. Mejora de la ductilidad, resistencia a la fatiga y de la adhesión fibra-resina.
3. Aplicación de *gelcoats* y revestimientos superficiales. Diversas empresas ya ofrecen esta tecnología, como es el caso de Aerox, que cuenta entre sus productos con un *gelcoat* específicamente diseñado para la protección de la superficie de las palas de un aerogenerador (AEROX, 2016).

---

#### 4.1.2. DISMINUCIÓN DEL USO DE MATERIALES Y DE LA HUELLA AMBIENTAL

En esta categoría se encuentran las herramientas de eco-diseño, 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 hayan en fase de investigación.

En esta área, se están desarrollando proyectos a nivel europeo como DREAMWIND, FiberEUse y ZEBRA.

---

#### 4.1.3. DISEÑO PARA RECICLABILIDAD EN LA ETAPA FIN DE VIDA

Se está investigando el uso de matrices termoplásticas que, como se ha explicado anteriormente, tienen una mayor reciclabilidad.

En este campo, la empresa Arkema desarrolló la resina termoplástica, Elium, la cual se puede reciclar a través de la despolimerización (ARKEMA, 2020).

Entre los proyectos que quieren demostrar la viabilidad de las palas eólicas fabricadas a partir de materiales termoplásticos se encuentra ZEBRA (Figura 14), que ha comenzado recientemente (IRT Jules Verne, 2020; LM Wind Power, 2020).



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

---

#### 4.1.4. MEJORA DE LA SEPARACIÓN DE COMPONENTES Y MATERIALES EN LA ETAPA DE FIN DE VIDA

Aunque todavía se encuentran en fase de investigación, se está trabajando en diversas tecnologías novedosas de enlace, como por ejemplo los adhesivos termoplásticos; y en la reticulación reversible de resinas termoendurecibles.

Uno de los proyectos en los cuales se ha estado trabajando en agentes aglutinantes que faciliten la separación de componentes, y por lo tanto la capacidad de reciclaje de las palas, es **DREAMWIND** (Dreamwind, 2017). Este proyecto está teniendo su continuación, con los mismos colaboradores, en el proyecto **CETEC**, que se presentará en apartados posteriores.

---

#### 4.1.5. PROYECTOS

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

Además de **DREAMWIND**, presentado en el apartado anterior, en septiembre de 2021 ha finalizado el proyecto europeo **FiberEUse**, cuyo objetivo ha sido la integración de diferentes acciones innovadoras con el objetivo de aumentar la rentabilidad del reciclaje y la reutilización de los materiales compuestos (FiberEUse, 2020).

Asimismo, en septiembre de 2020 se lanzó el proyecto **ZEBRA** con el objetivo de estudiar la producción de palas eólicas desde un enfoque de economía circular (IRT Jules Verne, 2020).

A continuación, se presentan estos tres proyectos.



## DREAMWIND

Designing REcyclable Advanced Materials for WIND energy

### *Colaboradores*



AARHUS UNIVERSITY



### *Objetivo*

Desarrollar nuevos materiales sostenibles que puedan ser usados en palas eólicas, dentro del marco de la economía circular. Se buscan materiales compuestos que puedan ser separados cuando se llegue al final de su vida útil, de forma que las fibras de vidrio de estos 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 dentro de sectores como la aeronáutica, la industria automovilística y la propia eólica. 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 millones € (17,6 millones DKK) y ha tenido una duración de 4 años (2016-2020).

### *Web*

<http://www.dreamwind.dk/en/>



## FIBEREUSE

### Colaboradores



### Objetivo

Demostración a gran escala de una cadena de valor de economía circular basada en la reutilización de materiales compuestos reforzados con fibra. Se buscó integrar diferentes innovaciones a través de un enfoque holístico para aumentar la rentabilidad de la reutilización y el reciclaje de los 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:

1. Reciclaje mecánico de fibras cortas y reutilización.
2. Reciclaje térmico de fibras largas y reutilización.
3. Inspección, reparación y reprocesamiento de fibras de carbono.

El proyecto fue financiado por la UE con casi 10 M€, comenzó en junio de 2017 y finalizó en septiembre de 2021.

### Web

<http://fibereuse.eu/>

## 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 eco-diseño para facilitar su reciclabilidad.

LM fabricará dos prototipos usando la resina de Arkema, 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 empezó en septiembre de 2020, durará 42 meses y contará con un presupuesto de 18,5 millones €.

### Web

<https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/news-from-lm-places/zebra-project-launched>

<https://www.irt-jules-verne.fr/en/>

## 4.2. REHABILITACIÓN

La solución más sencilla para una pala que ha sido desmantelada es 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 se pueden encontrar en buen estado y, aunque las palas eólicas son diseñadas para 20 años, tras ese periodo todavía tienen una alta capacidad residual. Por ello, en el desmantelamiento de un parque eólico, la primera consideración que debe tenerse es la posibilidad de recuperar los equipos, incluidas las palas, que por su naturaleza y estado siguen manteniendo un valor importante.

### 4.2.1. EVALUACIÓN TÉCNICA DE EXTENSIÓN DE VIDA

Para poder proceder a la reutilización de palas, se debe conocer la vida remanente de las palas 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 el modo de uso. Los procesos más habituales para la evaluación de las palas suelen incluir inspecciones visuales y ultrasónicas, la medición de las frecuencias naturales de la pala, y posteriormente, si es necesario, su reparación, refuerzo y pintura.

Así, por ejemplo, tres empresas ya han desarrollado estándares para la certificación de la extensión de vida de los aerogeneradores:

- UL cuenta con un estándar aprobado por ANSI, **ANSI UL 4143-2018**, con los requisitos para las normas y procedimientos para la extensión de vida de aerogeneradores.
- DNV-GL ha desarrollado dos estándares para la extensión de vida de los aerogeneradores (**DNVGL-ST-0262** y **DNVGL-ST-0263**), que incluyen las palas, con el objetivo de comprobar la viabilidad de que éstas sean adecuadas para seguir operando en condiciones de seguridad.
- SGS otorga certificaciones de extensión de vida a través de su procedimiento de certificación propio, el **SGS ECPE-2056**, con el cual realizan el análisis de fatiga, con cálculo de vida remanente de cada componente crítico del aerogenerador.

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 PALAS USADAS

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

- **Surus Inversa.** Empresa española que realiza soluciones llave en mano de economía circular, incluyendo la evaluación de los activos para comprobar la posibilidad de ampliar su ciclo de vida, la desinstalación y desmantelamiento, y, finalmente, el reempleo. En España, esta empresa realizó el desmantelamiento de los parques eólicos de Malpica, Zas y Corme (Figura 15), reutilizando parte de los elementos en otras plantas del propietario y comercializando el resto para que pudiesen ser reempleados (SURUS, 2020).



Figura 15: 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. Tienen sedes en Alemania, Holanda, Estados Unidos y España (Spares in Motion, 2020).

- **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. Esta empresa tiene su oficina central en Madrid (Repowering Solutions, 2020).
- **Wind-turbine.com.** Mercado on-line internacional para vender y comprar piezas de repuesto y accesorios para aerogeneradores (wind-turbine.com , 2020).

#### 4.3. REUTILIZACIÓN EN USOS DISTINTOS

Esta alternativa se basa en la reutilización de palas eólicas para propósitos estructurales o arquitectónicos no relacionados con los parques eólicos, aprovechando sus excelentes características mecánicas.

Aunque esta solución permite alargar 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.

Dentro de este área de trabajo, la empresa *SuperUse* ha desarrollado varios



Figura 16: Posible reutilización para palas eólicas desinstaladas en parques infantiles (Fuente: SuperUse y Jensen, 2017).

proyectos de reconversión de palas en parques infantiles mobiliario urbano y barreras acústicas para vías ferroviarias o carreteras, tal como se muestra en la Figura 16 y Figura 17 (SuperUse, 2021).

Otra alternativa que se ha planteado es aprovechar 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 18)

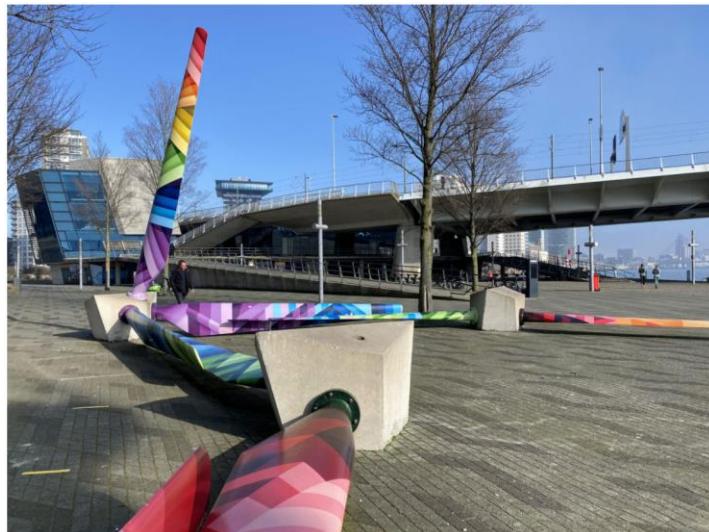


Figura 17: Palas eólicas reutilizadas como mobiliario urbano en Rotterdam (Fuente: SuperUse).

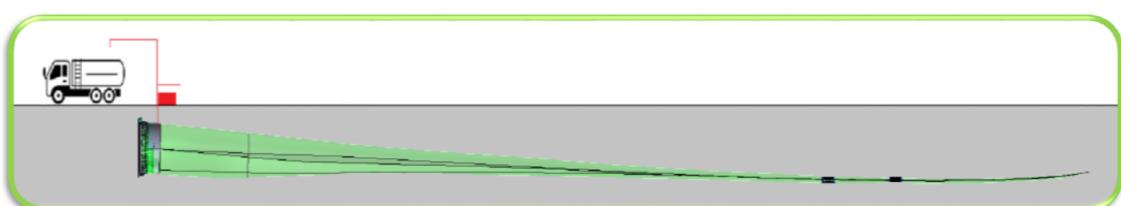


Figura 18: Reutilización de palas de aerogenerador como reservas de agua para usos múltiples (Fuente: Marco Asesoramiento Ambiental).

*Re-Wind*, plataforma de investigación en la rehabilitación y reciclaje de palas eólicas, publicó su “Atlas de Diseño” donde plantean posibles usos alternativos para las palas entre los que se incluyen asientos de gradas, barreras acústicas en carreteras, atenuadores de olas en zonas costeras, material para impresión 3D (tras ser procesadas y convertidas en polvo) o torres de telecomunicación (Re-Wind, 2018).

Otras alternativas propuestas y estudiadas a nivel teórico serían su reutilización como estructura para torres de transmisión de electricidad gracias a la alta resistencia mecánica de las palas, que le permitiría resistir las cargas a las que se vería afectada

(Alshannaq, et al., 2019), y su utilización en techos de naves y viviendas, como se observa en la Figura 19.



Figura 19: Aplicación de palas de aerogeneradores desmanteladas para tejados (Gentry, et al., 2020)

Por lo tanto, para impulsar este tipo de soluciones, una posible línea de trabajo sería la creación de una gama de productos y comercializarlos para diferentes usos.

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 los cuales ha diseñado uniformes fabricados con tejidos reciclados de botellas de plástico (Ecoalf, 2021).

#### 4.4. RECICLAJE MATERIAL

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

Tal como se ha explicado en el apartado 2 del presente documento, al utilizar principalmente resinas termoestables, los materiales compuestos resultantes no pueden ser fundidos y es complicado separar la matriz de las fibras de refuerzo. Esto supone que la complejidad de los materiales utilizados para la pala requiere de procesos

específicos para su reciclaje, pudiéndose distinguir principalmente tres tipos de reciclado: mecánico, térmico y químico.

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

En la Figura 20 se muestra la comparación de las diferentes tecnologías, con el coste relativo actual de cada una y su nivel TRL.

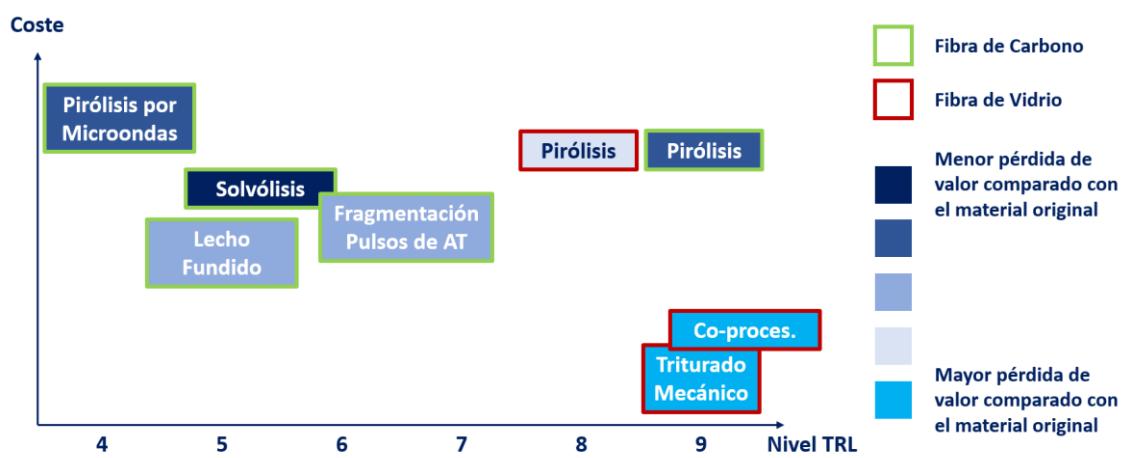


Figura 20: Comparativa de las diferentes tecnologías, adaptado de WindEurope, 2020.

#### 4.4.1. RECICLAJE MECÁNICO

El reciclado mecánico de las palas consiste en su triturado hasta conseguir la obtención de porciones pequeñas de material, de milímetros de tamaño, que son utilizados posteriormente para la obtención de nuevos productos.

Generalmente, el proceso comienza en el parque eólico, donde las palas son cortadas en segmentos de alrededor de 10 metros, 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 instalaciones de reciclado, los segmentos de pala son triturados mecánicamente, aunque se están investigando otros procesos como la fragmentación por pulsos de alta tensión.

## TRITURADO MECÁNICO

---

En estas plantas de preprocesamiento, las palas son cortadas y trituradas en trozos de pequeño volumen, con un tamaño final de milímetros. Los metales son posteriormente separados mediante imanes del resto de materiales.

El triturado mecánico tiene una gran eficiencia, por lo que suele ser ampliamente utilizado debido a su pequeño coste y la escasa energía necesaria, pero disminuye drásticamente el valor del material reciclado. El producto obtenido, principalmente fibra de vidrio, puede ser utilizado de relleno o como refuerzo.

Realizando una reducción y separación secundaria, se pueden obtener dos tipos de material de diferente morfología: un concentrado de fibras compuesto principalmente por grupos de fibras cubiertas por polímero; y una fracción heterogénea, compuesta por una mezcla de espuma de poliuretano (PUR) y partículas finas (LIFE+BRIO, 2017).

Sin embargo, tiene como principal desventaja la total pérdida de valor de las fibras.

## FRAGMENTACIÓN POR PULSOS DE ALTA TENSIÓN

---

La fragmentación del material compuesto por pulsos de alta tensión es un proceso electromecánico que separa con alta eficiencia las matrices de las fibras en los materiales compuestos mediante el uso de electricidad.

Como ventaja, comparado con el triturado mecánico, las fibras que se obtienen son de mayor calidad, además de tener una mayor longitud y limpieza.

Sin embargo, hasta la fecha sólo se han podido recuperar en el proceso fibras de pequeño tamaño y, para conseguir fibras de alta calidad, se requieren grandes niveles de energía. Se trata de una tecnología que se encuentra todavía en fase de investigación (WindEurope, 2020).

## APLICACIONES

---

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

Proyectos como **LIFE+ BRIO** buscan mejorar los procesos de reciclado mecánico, de forma que optimicen la recuperación de fibras inorgánicas contenidas en los materiales compuestos que constituyen las palas eólicas y fomentar la economía circular dentro del sector eólico mediante la utilización del producto obtenido para la elaboración de nuevos elementos.

En este proyecto, cuyos socios fueron Iberdrola, Fundación Gaiker y Tecnalia, los productos obtenidos del reciclaje mecánico fueron reutilizados para:

- Prefabricados de Hormigón, en los cuales el concentrado de fibras se utiliza como refuerzo (Figura 21).
- Paneles Sándwich, donde se utiliza la fracción heterogénea, junto con diversas resinas, como material de núcleo (Figura 22).



Figura 21: Prefabricado de hormigón a partir de material de palas (LIFE+BRIO, 2017).

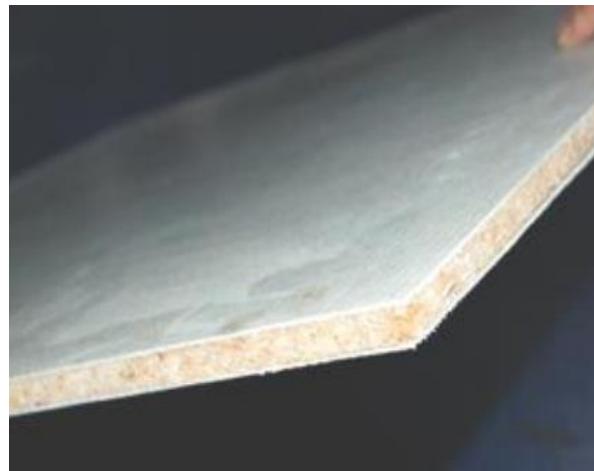


Figura 22: Panel sándwich a partir de material de palas (LIFE+BRIO, 2017).

## I. CO-PROCESAMIENTO DEL CEMENTO

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

En este proceso, ciertas materias primas del cemento (carbonato cálcico) son reemplazadas parcialmente por las fibras de vidrio, aprovechando la fracción orgánica del material compuesto de la pala como combustible en el propio proceso como sustituto del carbón. Esto significa que, a través de esta aplicación, se puede reducir

significativamente el uso de energía utilizada y la generación de  $CO_2$  asociada a la producción de cemento.

En Alemania se encuentra en funcionamiento la primera y única planta cementera que lleva a cabo este proceso a partir de palas de aerogeneradores desmanteladas, Holcim Lägerdorf (Figura 23). De la misma manera, el proyecto DecomBlades, presentado en el próximo apartado, también se encuentra investigando el uso de material de la hoja triturado para 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 y por su alta eficiencia. Además, es un tratamiento rápido que permite procesar grandes cantidades de residuos sin tener como subproducto cenizas.

Sin embargo, esta solución también tiene una serie de desventajas, dado que a pesar de que la menor densidad del compuesto comparada con el carbonato cálcico es una ventaja al crear cementos más ligeros, significa también que las propiedades de este tipo de cementos van a ser diferentes a los habituales.

Los resultados publicados hasta la fecha ponen de manifiesto la importancia de obtener una calidad consistente del material compuesto triturado para conseguir mejores propiedades en el cemento. Si no se logra esto, existen dos problemas que pueden derivarse del uso de fibra de vidrio para la fabricación de cemento. En primer lugar, las propiedades ácidas del cemento pueden provocar que la fibra de vidrio se deteriore con el tiempo, mientras que la fibra de vidrio puede tener efectos negativos en la dureza, maleabilidad y la resistencia a la congelación del cemento. Esto puede llevar a la necesidad de que el cemento sea reemplazado con mayor frecuencia.

En segundo lugar, se ha comprobado que la superficie que crea la resina en materiales compuestos reduce la fuerza de enlace entre el cemento y el material compuesto (Fox, 2016).



Figura 23: Planta Holcim Lägerdorf, única planta cementera en utilizar residuos de palas eólicas para la fabricación de cemento (Fuente: WindEurope).

Para evitar estos inconvenientes, cobra especial importancia la 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, al ser una solución que puede ser implementada rápidamente y es fácilmente escalable.

Esto se pone claramente de manifiesto gracias a noticias como el acuerdo firmado en 2020 entre GE Renewable Energy y Veolia para la utilización de material reciclado mecánicamente de palas 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 un 27% las emisiones relacionadas con la fabricación de cemento (REVE, 2020).

## II. 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 que ha sido estudiada en los últimos años ha sido la inclusión de fibra de vidrio en la estructura del asfalto que permita mejorar la resistencia del firme (Nguyen, et al., 2013).



Figura 24: Asfalto fabricado incluyendo fibra de vidrio reciclada de palas de aerogeneradores (Life Refibre, 2020).

construcción de 1.500 m de carretera, para poder estudiar el rendimiento del asfalto (Figura 24).

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

Combinando este objetivo con el que nos ocupa en el presente documento, nace el proyecto europeo **Life Refibre**, en el cual se buscaba tratar mecánicamente las palas de los aerogeneradores, de forma que se obtuviese fibra de vidrio de pequeño tamaño, que pudiese ser utilizada posteriormente en la fabricación de aglomerado asfáltico, de forma que se mejorasen sus propiedades mecánicas. El producto obtenido en el proyecto fue utilizado en la

1. Pretratamiento cuyo objetivo era 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 estudió el porcentaje adecuado de fibra de vidrio a incluir en el asfalto, que se limitó al 1% para cumplir con los requisitos técnicos de asfaltado según la normativa española y especificaciones autonómicas, para luego probar diversas opciones en el firme construido. Posteriormente, se ha monitorizado el firme 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) (Life Refibre, s.f.).

### III. PANELES Y BARRERAS ACÚSTICAS

El material triturado también puede ser utilizado en paneles y barreras de aislamiento acústico mediante el uso de pegamento para conseguir el aglomerado, tal como está desarrollando Miljøskærm (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.**). Esta empresa danesa consigue productos a partir de palas trituradas los cuales tienen estudios acústicos similares a los paneles acústicos actualmente utilizados (Miljøskærm, 2020).



Figura 25: Barreras acústicas fabricadas a partir de palas recicladas (Fuente: Miljøskærm).

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

---

#### 4.4.2. RECICLAJE TÉRMICO

Los procesos de reciclaje térmico se basan en la aplicación de procesos térmicos a los residuos de las palas para conseguir la combustión de la parte orgánica y obtener como producto las fibras. Varias alternativas están siendo exploradas, incluyendo la pirólisis, la pirólisis por microondas y el proceso de lecho fundido.

---

#### PIRÓLISIS

La pirólisis es la descomposición térmica de materiales a elevadas temperaturas y atmósferas inertes (ausencia de oxígeno). Se trata de un proceso de reciclaje que ya es usado para otras aplicaciones, del cual se obtienen como productos combustible y energía para el propio proceso térmico.



Figura 26: Horno de pirólisis para realizar el reciclado térmico de las palas (Fuente: Reciclatia).

Al aplicar la pirólisis a las palas eólicas, la matriz polimérica se degrada hasta conseguir una mezcla de hidrocarbonos, obteniendo como producto del proceso las fibras de vidrio. Aunque las temperaturas utilizadas en este proceso son más bajas que en otras tecnologías, siguen siendo lo suficientemente altas para dañar la superficie de las fibras, conlleva cierta degradación en las mismas, lo que significa una disminución de las pérdidas mecánicas (Kalkanis, et al., 2018). No obstante, las fibras de vidrio pueden ser

recuperadas y reutilizadas para otras aplicaciones no estructurales, lo que supone su ventaja más importante (Akesson, et al., 2012).

Una de sus principales desventajas es su alto coste de inversión y operación, por lo que su viabilidad económica dependerá de la escala y 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 (WindEurope, 2020).

## PIRÓLISIS POR MICROONDAS

---

La pirólisis por microondas es un sistema 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 habitualmente tienen una conductividad térmica muy baja, por lo que, al recurrir a microondas, la temperatura utilizada puede ser mucho menor, consiguiendo una menor degradación de las fibras de vidrio (Akesson, et al., 2012).

Por tanto, su ventaja primordial es que permitiría conservar mejor las propiedades mecánicas de las fibras de vidrio que se pierden en el caso de la pirólisis convencional, y reducir la cantidad de energía utilizada. Además, se trata de una tecnología que es más controlable (WindEurope, 2020).

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

## LECHO FLUIDO

---

El proceso de reciclaje por lecho fluido se utiliza para quemar la resina matriz del material compuesto y poder tener como producto de la combustión las fibras. Para ello, las palas son trituradas hasta conseguir pellets de pequeño tamaño, que son introducidos en el reactor de lecho fluido, donde se pueden alcanzar temperaturas de hasta 550°C (Kalkanis, et al., 2018).

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 en fase de investigación (WindEurope, 2020).

## 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.

Hasta el momento, en España, **Reciclatia** es la única empresa que está prestando servicios de reciclaje térmico de materiales compuestos a nivel comercial. Esta empresa, una vez la pala ha sido desinstalada, lleva a cabo el procesado mecánico de la misma en un sistema automatizado y móvil en el propio parque eólico (Figura 27), para trasladarla posteriormente a sus instalaciones, donde aplican a los residuos la pirólisis. En el tratamiento térmico se elimina la resina del material compuesto, degradando las fibras del mismo 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 sectores donde requieran fibras cortas (Reciclatia, 2017).



Figura 27: Mecanizado de las palas in-situ, para prepararlas para su posterior tratamiento térmico (Reciclatia, 2017).

*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).

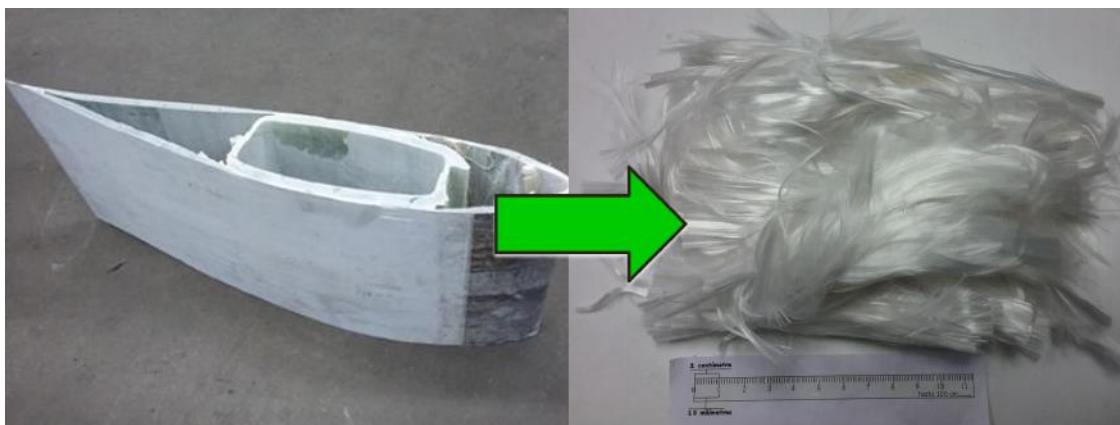


Figura 28: Fibra reciclada obtenida a partir de R3FIBER (TRC, 2016).

Estudios realizados por el CENIM-CSIC han concluido que estas fibras apenas sufren modificaciones en sus propiedades mecánicas. Actualmente están trabajando en fabricar nuevos materiales compuestos a través de fibra reciclada que puedan ser utilizados en otros sectores como la automoción o el industrial (TRC, 2016).

A nivel internacional, se pueden encontrar iniciativas similares, como en Alemania, donde la empresa **neocomp** fue creada con el objetivo de poder reciclar de forma sostenible los materiales compuestos con fibra de vidrio, especialmente los provenientes del sector eólico (neocomp GmbH, 2020).

En Holanda, **DemacqRecycling** contribuye a la economía circular a través del reciclaje a gran escala de materiales compuestos termoestables (compuestos de fibra de vidrio y una resina sintética), entre ellos los residuos obtenidos del desmantelamiento de palas eólicas. El material reciclado obtenido en su proceso es después reusado para realizar nuevos productos y aplicaciones, como el puente mostrado en la Figura 29 (Demacq Recycling, 2020).



Figura 29: Puente fabricado a partir de materiales compuestos reciclados (Demacq Recycling, 2020).

Por último, en el proyecto **DecomBlades**, de un consorcio formado por 10 empresas entre las que desatacan LM Wind, Siemens Gamesa y Vestas, se investigarán soluciones para reciclar el material compuesto de las palas de los aerogeneradores con el objetivo de sentar las bases para la comercialización del reciclaje de palas de aerogeneradores mediante soluciones sostenibles. Este proceso de tres años de duración se centrará en tres procesos vistos a lo largo de 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 hoja triturado en la producción de cemento;
3. Pirólisis.

---

#### 4.4.3. RECICLAJE QUÍMICO

##### 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. Es decir, 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 eólicas, los materiales compuestos pueden ser reciclados a través de este tipo de reacción utilizando el agua como disolvente que, bajo unas condiciones específicas, produce en la resina la despolimerización termoquímica. Este proceso provoca la ruptura de los enlaces de las resinas termoestables, permitiendo la separación de estas resinas 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 (Gopalraj & Kärki, 2020).

Comparado con otros procesos térmicos, la solvólisis requiere menores temperaturas de trabajo para lograr la degradación de las resinas, suponiendo, 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.

## PROYECTOS

El reciclado químico está siendo investigado y desarrollado por varias iniciativas, siendo una de las más interesantes el **proyecto CETEC**, liderado por Vestas en colaboración con el DTI (Danish Technical Institute), Aarhus University y Olin, siendo parcialmente financiado por el Innovation Fund Denmark.

El objetivo del proyecto CETEC (Economía Circular para los Materiales Compuestos de Epoxi Termoestable) busca desarrollar una nueva tecnología que permita aumentar la circularidad de las resinas epoxi termoestables, de los 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 (Figura 30) consistirá en la separación de la fibra y la resina epoxi y en un proceso de chemcycling (reciclado químico de

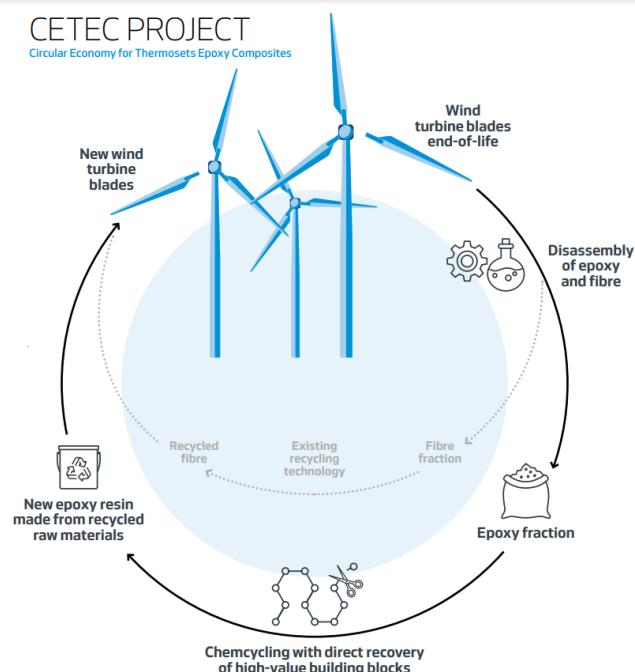


Figura 30: Proyecto CETEC (Fuente: CETEC/Vestas).

residuos plásticos), que disolverá las resina epoxi 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 epoxi.

#### 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.

Los materiales compuestos utilizados para la estructura de la pala contienen hasta un 70% en peso de fibra de vidrio, la cual no es combustible y dificultará el proceso (Beauson & Brøndsted, 2016), 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.

## 5. CONCLUSIONES Y PRÓXIMOS PASOS

A lo largo de este documento se han presentado diferentes soluciones que existen a día de hoy para avanzar hacia el objetivo de conseguir la total reciclabilidad de las palas de los aerogeneradores.

La necesidad del impulso y desarrollo de estas tecnologías viene motivada por los volúmenes de palas 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 es la dificultad para encontrar colaboradores para el reciclado de forma estable, y la inexistencia de una figura a nivel comercial que absorba el volumen generado y lo transforme en un subproducto (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 objetivo del sector eólico es reducir el volumen de residuos, lo cual debe atajarse en las primeras etapas del ciclo de vida de las palas. Así, para las futuras palas, nuevos diseños optimizados y su fabricación a partir de materiales reciclables permitirán lograr la circularidad de los materiales.

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

El reciclado mecánico y la utilización del producto triturado en el co-procesamiento de cemento es la solución más desarrollada y la que mayor volumen de materiales compuestos puede tratar a día de hoy. Sin embargo, 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 otro lado, 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 desarrollándose 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 en sus primeras etapas de investigación y desarrollo, requiriendo todavía ser probadas en entornos industriales.

Por lo tanto, para lograr que 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. Es decir, **es clave garantizar un flujo constante de materiales para consolidar tecnologías y reducir costes.**

Para ello, será importante la **colaboración con otros sectores que hagan un uso intensivo de materiales compuestos** de fibra de vidrio y carbono, como es el caso de la construcción, la aeronáutica o el sector naval.

Asimismo, es necesario asegurar una calidad uniforme en el producto obtenido del reciclado, que permita su reintroducción en un proceso productivo, de manera que se convierta en la materia prima en la elaboración de nuevos elementos o materiales. Para ello, además, 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 de avanzar en la integración de diferentes actores que cubran toda la cadena de valor, desde la generación del residuo, hasta el producto final, generando una entramado de industria nacional que permita la escalabilidad industrial y comercial.**

**Para ello, 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

- AEE, 2006. *Eólica 06. Todos los datos, análisis y estadísticas del sector eólico*, Madrid: AEE.
- AEE, 2020. *Anuario Eólico 2020*, Madrid: AEE.
- AEROX, 2016. *Aerox. Advanced Polymers*. [En línea] Available at: <https://www.aerox.es/> [Último acceso: 20 Octubre 2021].
- Akesson, D., Foltynowicz, Z., J. C. & Skrifvars, M., 2012. Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(17).
- Alshannaq, A. y otros, 2019. Structural Re-Use of De-Commissioned Wind Turbine Blades in Civil Engineering Applications.
- ARKEMA, 2020. *Elium® resins for composites*. [En línea] Available at: <https://www.arkema.com/en/products/product-finder/range-viewer/Elium-resins-for-composites/> [Último acceso: 20 Octubre 2020].
- BBI JU, 2020. *BIZENTE*. [En línea] Available at: <https://www.bbi-europe.eu/projects/bizente> [Último acceso: 16 11 2020].
- Beauson, J. & Brøndsted, P., 2016. Wind Turbine Blades: An End of Life. En: W. Ostachowicz, M. McGugan, J. Schröder-Hinrichs & M. Luczak, edits. *MARE-WINT. New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology*. s.l.:Springer Open.
- BIZENTE, 2020. *BIZNETE*. [En línea] Available at: <https://bizente.eu/> [Último acceso: 16 Noviembre 2020].
- C. Bernabéu, E. S., 2017. *Auditoría profunda de palas de aerogeneradores con SARP, la importancia del factor Bio*, s.l.: Aracnóptero,.
- CEWEP, 2020. *Landfill taxes and bans. Overview*, s.l.: s.n.
- CompositesLab, 2020. *What Are Composites?*. [En línea] Available at: <http://compositeslab.com/composites-101/what-are-composites/> [Último acceso: 27 Octubre 2020].
- Coprocesamiento.org, s.f. *¿Qué es el Coprocesamiento?*. [En línea] Available at: <https://coprocesamiento.org/coprocesamiento-es-una-buena-opcion/>
- Demacq Recycling, 2020. *DemacqRecycling*. [En línea] Available at: <https://www.demacq.nl/en/> [Último acceso: 15 Octubre 2020].
- Dreamwind, 2017. *Dreamwind*. [En línea] Available at: <http://www.dreamwind.dk/en/> [Último acceso: 14 10 2020].
- Ecoalf, 2021. *Ecoalf*. [En línea] Available at: <https://ecoalf.com/es/?adin=02021864894> [Último acceso: 19 Febrero 2021].
- European Commission , 2012. *Preparing a Waste Prevention Programme*, s.l.: s.n.
- FiberEUse, 2020. *FiberEUse*. [En línea] Available at: <http://fibereuse.eu/> [Último acceso: Octubre 19 2021].
- Fox, T. R., 2016. *Recycling wind turbine blade composite material as aggregate in concrete*, Ames, Iowa: Iowa State University.
- FSC, 2021. *FSC Bosques para Todos para Siempre*. [En línea] Available at: <https://es.fsc.org/es-es> [Último acceso: 13 Agosto 2021].
- Gentry, R. y otros, 2020. Structural Analysis of a Roof Extracted from a Wind Turbine. *American Society of Civil Engineers*.
- GIEC, 2020. *Grupo Interplataformas de Economía Circular*. [En línea] Available at: <https://www.giec.es/> [Último acceso: 17 Febrero 2021].
- Gopalraj, S. K. & Kärki, T., 2020. A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. *SN Applied Sciences*.
- Hill+Knowlton Strategies, 2021. *La Regulación en Materia de Residuos y Economía Circular en España*, s.l.: Hill+Knowlton Strategies.

- IRT Jules Verne, 2020. *Communiqué de Presse: L'IRT Jules Verne et un consortium d'acteurs industriels lancent le projet ZEBRA*. Nantes: s.n.
- Jensen, J. P., 2017. *GenWind. Experiences in managing composite waste for a more circular wind industry*. Madrid, s.n.
- Joncas, S., 2010. *Thermoplastic Composite Wind Turbine Blades: An Integrated Design Approach*. Delft: TU Delft.
- Kalkanis, K. y otros, 2018. *Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability*. Athens, TMREES18.
- Life Refibre, 2020. *Life Refibre*. [En línea] Available at: <https://www.liferefibre.eu/> [Último acceso: 7 Enero 2021].
- Life Refibre, s.f. *Layman's Report: Pavimentos asfálticos de alto valor añadido con fibra de vidrio procedente del reciclaje sostenible de las palas de aerogeneradores*, s.l.: s.n.
- LIFE+BRIO, 2017. *Desmantelamiento y Reciclaje de las Palas Eólicas*, s.l.: s.n.
- Liftra, 2017. *Desmantelamiento de aerogeneradores y el reciclaje de componentes según los principios de sostenibilidad*. Madrid, AEE.
- LM Wind Power, 2020. 'ZEBRA project' launched to develop first 100% recyclable wind turbine blades. [En línea] Available at: <https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/news-from-lm-places/zebra-project-launched> [Último acceso: 25 Octubre 2020].
- Martin, C., 2020. *Wind Turbine Blades Can't Be Recycled, So They're Piling Up in Landfills*. [En línea] Available at: <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills>
- Matt, A. K. K., Strong, S., Elgammal, T. & Amano, R. S., 2016. Self-Healing Tubing in Wind Turbine Blades. *Journal of Energy Resources Technology*.
- Miljøskærm, 2020. *Miljøskærm*. [En línea] Available at: <http://miljoskarm.dk/english/> [Último acceso: 20 Octubre 2020].
- Mishnaevsky, L. y otros, 2017. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials (Basel)*, p. 11.
- Nagle, A. J., Delaney, E. L., Bank, L. C. & Leahy, P. G., 2020. A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades. *Journal of Cleaner Production*.
- neocomp GmbH, 2020. *neocomp*. [En línea] Available at: <https://www.neocomp.eu/de/> [Último acceso: 15 Octubre 2020].
- Nguyen, M. L., Blanc, J., Kerzreho, J. P. & Horny, P., 2013. Review of glass fibre grid use for pavement reinforcement and APT experiments at IFSTTAR. *Road Materials and Pavement Design*.
- RDC Environment , 2017. *Étude Comparative de la Taxation de l'Élimination des Déchets en Europe*, s.l.: ADEME.
- Reciclatia, 2017. *Reciclatia*. [En línea] Available at: <https://reciclatiacomposite.com/wordpress/> [Último acceso: 15 Octubre 2020].
- Red Eléctrica de España, 2020. *Borrador del Plan. Desarrollo de la red de transporte de energía eléctrica. Periodo 2021-2026.*, s.l.: s.n.
- REOLTEC, 2020. *Innovación en el Sector Eólico 2000-2020*, Madrid: s.n.
- Repowering Solutions, 2020. *Repowering Solutions*. [En línea] Available at: [http://repoweringsolutions.com/productos/aerogeneradores\\_reacondicionados/index.htm](http://repoweringsolutions.com/productos/aerogeneradores_reacondicionados/index.htm) [Último acceso: 20 Octubre 2020].
- REVE, 2020. *REVE*. [En línea] Available at: [https://www.evwind.es/2020/12/08/ge-renewable-energy-announces-us-wind-turbine-blade-recycling-agreement-with-veolia/78446](https://www.evwind.es/2020/12/08/ge-renewable-energy-announces-us-wind-turbine-blade-recycling-agreement-with-veolia/) [Último acceso: 7 Enero 2021].
- Re-Wind, 2018. *Re-Wind. Design Atlas*. s.l., s.n.
- Rothbarth, D. F., 2020. *Covestro*. [En línea] Available at: <https://www.covestro.com/press/covestro-goldwind-and-lz-blades-develop-worlds-first-642-meter-polyurethane-wind-turbine-blade/> [Último acceso: 20 Octubre 2020].
- Sieros, G. y otros, 2012. Upscaling Wind Turbines: theoretical and practical aspects and their impact on the cost of energy. *Wind Energy*, 15(1), pp. 3-17.

Spares in Motion, 2020. *Spares in Motion*. [En línea] Available at: <https://www.sparesinmotion.com/> [Último acceso: 20 Octubre 2020].

SuperUse, 2021. *SuperUse*. [En línea] Available at: <https://www.superuse-studios.com/> [Último acceso: 10 Noviembre 2021].

SURUS, 2020. *SURUS*. [En línea] Available at: <https://www.surusin.com/> [Último acceso: 20 Octubre 2020].

TRC, 2016. *bcircular*. [En línea] Available at: <https://www.bcircular.com/es/> [Último acceso: 15 Octubre 2021].

Unwin, J., 2019. *Tvindkraft – the oldest operating wind turbine in the world*. [En línea] Available at: <https://www.power-technology.com/features/oldest-operating-wind-turbine-tvindkraft/>

WindEurope, 2020. *Accelerating Wind Turbine Blade Circularit*y, s.l.: s.n.

WindEurope, 2020. *How to Build a Circular Economy for Wind Turbine Blades through Policy and Partnerships*, Bruselas: WindEurope.

wind-turbine.com , 2020. *wind-turbine.com Global Market*. [En línea] Available at: <https://wind-turbine.com/> [Último acceso: 20 Octubre 2020].

INFORMACIÓN  
CONTACTO

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](http://www.aeeolica.org)

[aeeolica@aeeolica.org](mailto:aeeolica@aeeolica.org)