Universidad Rey Juan Carlos

Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

GRADO EN INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL

Curso Académico 2024/25

Trabajo de Fin de Grado

ANÁLISIS AMBIENTAL Y ECONÓMICO DE LAS RUTAS DISPONIBLES PARA EL RECICLAJE DE LAS PALAS DE AEROGENERADORES

Autor: Blanca de Rojas Pita-Romero

Tutores: Gema Gómez Pozuelo

Índice

1. Resumen 7
2. Introducción 9
   2.1. Estructura y composición de las palas de los aerogeneradores 13
   2.2. Métodos y tecnologías tradicionales para el reciclaje de las palas de aerogenerador 16
      2.2.1. Reciclaje mecánico 17
      2.2.2. Reciclaje térmico 19
      2.2.3. Reciclaje químico 20
   2.3. Normativa vigente del reciclaje de palas 21
3. Objetivos 25
4. Metodología 26
5. Resultados y discusión 28
   5.1. Análisis preliminar de materiales y contexto 28
      5.1.1. Análisis de la composición de las palas 28
      5.1.2. Estado actual del reciclaje de materiales compuestos 29
   5.2. Métodos seleccionados para el estudio 30
      5.2.1. Incineración 30
      5.2.2. Vertedero 31
      5.2.3. Reciclaje mecánico 32
      5.2.4. Reciclaje térmico 33
         5.2.4.1. Pirólisis 33
         5.2.4.2. Lecho fluidizado 34
      5.2.5. Proceso químico 35
         5.2.5.1. Solvólisis 35
   5.3. Análisis comparativo de los métodos de reciclaje de palas 36
      5.3.1. Condiciones generales 36
      5.3.2. Descripción de la pala a estudio 37
      5.3.3. Ubicación de la planta de reciclado 38
      5.3.4. Recuperación de materiales 40
      5.3.5. Consumo energético 42
      5.3.6. Emisiones asociadas 43

5.3.7. Análisis económico 44
5.4. Evaluación global del método mecánico 47
5.4.1. Análisis ambiental – Matriz de Leopold 47
5.4.2. Análisis DAFO 48
5.4.3. Análisis PESTEL 49
5.4.4. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 51
5.5. Alternativas de los métodos de reciclaje: extensión de la vida útil 52
6. Conclusiones 54
7. Bibliografía 55

Índice de Figuras

Figura 1. Capacidad acumulada de energía renovable mundial desde 2009 hasta 2023 [1]. 9

Figura 2. Parque eólico de Castelo, A Coruña [9]. 11

Figura 3. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [11]. 12

Figura 4. Composición en materiales de los principales componentes de un aerogenerador terrestre [15]. 13

Figura 5.Componentes de un aerogenerador [19]. 14

Figura 6. Diagramas esquemáticos de (a) la estructura y (b) los componentes principales de las palas de aerogenerador comúnmente utilizadas [17]. 15

Figura 7. Métodos de reciclaje para materiales compuestos termoestables. 17

Figura 8. Parque infantil en la ciudad de Rotterdam, Países Bajos fabricado con palas de aerogenerador [24]. 18

Figura 9. Mobiliario urbano fabricado con palas de aerogenerador en Rotterdam, Países Bajos [24]. 18

Figura 10. Jerarquía de la gestión de residuos según la Directiva 2008/98/CE [36]. 22

Figura 11. Etapas del proceso de realizado para el presente estudio. 27

Figura 12. Material de fibra de vidrio (izquierda) [46] y fibra de carbono (derecha) [47]. 29

Figura 13. Vertedero de las palas de aerogenerador [57]. 32

Figura 14. Procesos de reciclaje mecánico de aerogeneradores al final de su vida útil [17]..... 33

Figura 15. Proceso de pirólisis empleado en el reciclaje de las palas de aerogenerador [43]. 34

Figura 16. Diagrama de proceso de lecho fluidizado [31,44,58]. 35

Figura 17. Diagrama de proceso de solvólisis para el reciclaje de palas de aerogeneradores [62]. 36

Figura 18. Procesos considerados en la evaluación del ciclo de vida de las estrategias para el final de vida de las palas de aerogenerador [36]. 37

Figura 19. Imagen de referencia de una pala de aerogenerador [63]. 38

Figura 20. Ubicación aérea de las supuestas plantas de reciclado. 40

Figura 21. Distribución porcentual de material reciclado en diferentes categorías [18,36]. 41

Figura 22. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por Pala ($kg\ CO2eq$ por pala) [36]. 44

Figura 23. Análisis DAFO del reciclaje mecánico de las palas de aerogeneradores. 49

Figura 24. Análisis PESTEL del reciclaje mecánico de las palas de aerogeneradores. 51

Índice de Tablas

Tabla 1. Nivel de madurez tecnológica (TRL) [48]. 30

Tabla 2. Resumen de las características del material reciclado [18,21,42,44,58]. 42

Tabla 3. Datos del consumo energético de los diferentes métodos de reciclaje [18,44,52]. 43

Tabla 4. Estimación de los costes del reciclaje de palas [44,45,52,68,69]. 47

Tabla 5. Matriz Leopold del reciclaje mecánico. 48

1. Resumen

En las últimas décadas, el crecimiento demográfico, el aumento del nivel de vida y la expansión de la actividad industrial han incrementado considerablemente la demanda global de energía. Aunque se ha avanzado en la incorporación de fuentes renovables al mix energético, la realidad es que los combustibles fósiles todavía dominan la producción eléctrica mundial. Esta dependencia ha contribuido al calentamiento global y ha hecho evidente la urgencia de una transición hacia modelos energéticos más sostenibles y respetuosos con el medioambiente.

En este escenario, la energía eólica se ha consolidado como una de las principales alternativas renovables, no solo por su baja huella de carbono, sino también por su madurez tecnológica y su capacidad para competir con otras formas de generación eléctrica. En concreto, España ha experimentado un gran desarrollo del sector eólico, hasta el punto de que esta fuente se ha convertido en una de las principales del país, superando incluso a tecnologías tradicionalmente dominantes como la hidráulica o la nuclear. Sin embargo, este éxito trae consigo nuevos desafíos, siendo uno de los más relevantes la gestión del final de vida de los parques eólicos. Muchos de los aerogeneradores instalados en el ámbito nacional, están llegando al final de su vida útil. Como solución, se ha apostado por la repotenciación, que consiste en sustituir los equipos antiguos por otros más modernos, potentes y eficientes. Esta estrategia permite aprovechar infraestructuras ya existentes, reducir el impacto ambiental y aumentar la producción sin necesidad de ocupar nuevos terrenos. No obstante, esta renovación tecnológica presenta un problema complejo: la gestión de los residuos, en particular, el de las palas de los aerogeneradores. A diferencia de otros componentes, las palas están fabricadas con materiales compuestos, principalmente fibra de vidrio y resinas epoxi, que ofrecen excelentes propiedades estructurales y mecánicas, pero cuya gestión como residuo resulta especialmente complicada. Estos materiales no son biodegradables, presentan una elevada resistencia al deterioro y son muy difíciles de reciclar por su estructura química entrecruzada. A esto se suma que su valor económico como residuo es bajo, lo que limita las opciones de recuperación a gran escala.

En este trabajo se ha abordado el problema desde una mirada técnica, ambiental y sostenible. Se ha realizado un análisis detallado de la composición, diseño y comportamiento de las palas de aerogeneradores, así como de las condiciones a las que se ven sometidas durante su vida operativa. A partir de ahí, se han revisado las principales tecnologías actuales para su reciclaje, que son los métodos mecánicos, térmicos y químicos, donde cada uno presenta diferentes ventajas e inconvenientes.

Entre estas tecnologías, el reciclaje mecánico se presenta como la alternativa más accesible y viable a corto plazo. Esto se debe a que es una tecnología desarrollada (con un nivel TRL 8), que consume poca energía (alrededor de 0,27 MJ/kg), con un bajo coste operativo y puede recuperar hasta un 95 % del material de las palas. Aunque la calidad de la fibra recuperada no es elevada, al fragmentarlas y no poder separar fibra y matriz, este método ofrece beneficios significativos para el medio al minimizar el impacto sobre el suelo, el agua y la biodiversidad, sin recurrir a productos químicos peligrosos.

Además, el reciclaje mecánico impulsa la economía circular al reutilizar materiales en mobiliario urbano, elementos constructivos o incluso piezas artísticas, ayudando así a disminuir la necesidad de materias primas vírgenes y a reducir la cantidad de residuos. Sin embargo, es importante destacar que este proceso genera residuos secundarios, como polvo, que deben manejarse adecuadamente para evitar riesgos tanto para la salud de los trabajadores como para el entorno. En conjunto, esta solución esta alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente en aspectos como la innovación, la producción responsable y la protección ambiental, lo que la convierte en una opción ambientalmente responsable y socialmente viable.

Por otro lado, los métodos térmicos, como la pirólisis y el lecho fluidizado, permiten recuperar fibras de mejor calidad mecánica, pero su elevado consumo energético y mayores emisiones contaminantes limitan su sostenibilidad. La solvólisis, aunque es todavía una tecnología emergente, muestra potencial para recuperar fibras con propiedades mecánicas superiores, pero todavía no hay suficiente información técnica, económica y ambiental a escala industrial para considerarse una solución consolidada.

La extensión de vida útil de las palas se presenta como una estrategia preventiva complementaria que retrasa la generación de residuos y reduce la demanda de materiales nuevos, siendo económicamente rentable y energéticamente favorable, siempre que se realicen mantenimientos e inspecciones rigurosas.

En definitiva, garantizar la sostenibilidad de la energía eólica a largo plazo no pasa solo por su capacidad de generar electricidad limpia, sino también por cómo se gestionan los residuos que produce, especialmente los derivados de componentes tan complejos como las palas de los aerogeneradores. Para que esta fuente energética sea verdaderamente sostenible, es imprescindible desarrollar estrategias eficaces para el tratamiento del fin de vida de estos elementos. En este sentido, la combinación de medidas preventivas, como la extensión de la vida útil, junto con el proceso de reciclaje mecánico, es la opción más equilibrada desde el punto de vista técnico, económico y ambiental. Aunque tecnologías más avanzadas como la solvólisis podrían ofrecer soluciones más efectivas en el futuro, por ahora, apostar por el reciclaje mecánico y la prolongación de uso es la mejor vía para asegurar una gestión integral del ciclo de vida de los aerogeneradores.

2. Introducción

El consumo de energía ha sufrido un incremento de un 5 % entre el año 2000 y 2020 debido al aumento en la demanda energética y el crecimiento de la población. Las principales fuentes de energía empleadas para la generación de electricidad son los combustibles fósiles, la energía nuclear y las energías renovables. Pese a las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera y su contribución al cambio climático, los combustibles fósiles siguen siendo la principal fuente de generación de energía, produciendo alrededor de un 81 % del total. Como resultado de la dependencia a dichos recursos limitados y el desencadenamiento de problemas económicos y geopolíticos, ha llevado a la población a la búsqueda de fuentes de energía renovables como una opción más ecológica [1].

Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, sus siglas en inglés), la demanda de energías renovables sigue en aumento y se espera que para el 2050 la contribución de dichas energías en la generación de electricidad alcance un 85 %, encabezada por la energía solar fotovoltaica y la eólica terrestre [1]. La *Figura* 1 muestra el crecimiento constante en la capacidad de energía renovable desde 2009 hasta 2023.

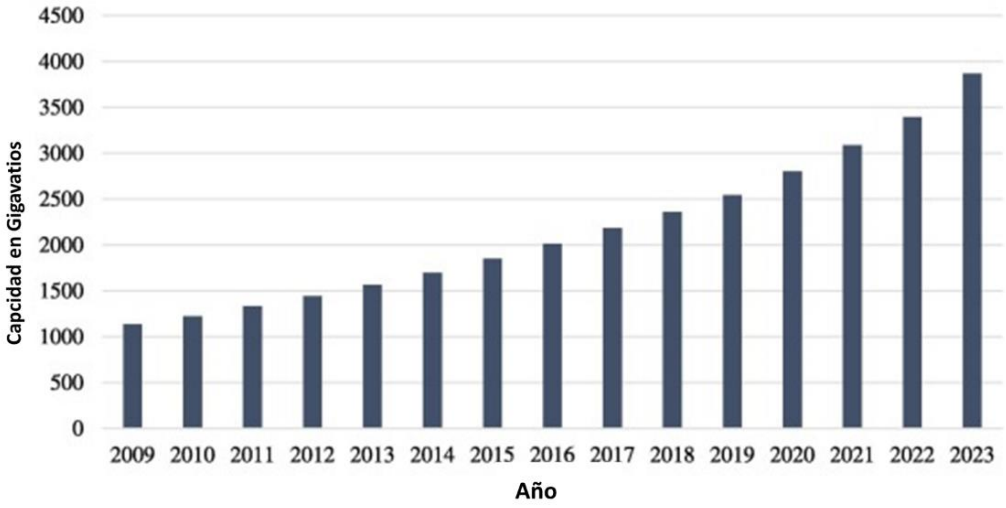

Figura 1. Capacidad acumulada de energía renovable mundial desde 2009 hasta 2023 [1].

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) presenta datos sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. El carbón, por ejemplo, alcanza valores entre los 820 y 1.050 gramos de CO_2-eq/kWh, mientras que el gas natural emite solo entre 450 y 550 gramos de CO_2-eq/kWh. En contraste, las tecnologías renovables presentan emisiones mucho menores, como la energía eólica terrestre que genera, aproximadamente, 12 gramos CO_2-eq/kWh, siendo una de las fuentes más limpias, solo superada por la hidroeléctrica. Estos datos demuestran que la energía eólica, además de ser una fuente renovable contribuye a la descarbonización del sistema energético global [2].

En los últimos años, la energía eólica ha experimentado un crecimiento significativo en España, consolidándose como una de las principales fuentes de energía renovable. Su desarrollo ha sido

impulsado por avances tecnológicos y medidas gubernamentales que promueven la transición hacia un modelo energético más limpio y eficiente. Además, en términos de producción total, la energía eólica ha superado a otras tecnologías renovables, lo que demuestra su importancia en el ámbito energético del país [3].

En España, los primeros aerogeneradores están datados de 1998. A partir de ese momento, la capacidad instalada y el número de turbinas eólicas aumentaron hasta 2012, año en el cual se detuvo la construcción de nuevos parques eólicos causado por la disminución de lugares adecuados para dicha instalación. Desde entonces se optó por la regeneración de las turbinas envejecidas [4]. La *Figura* 2 muestra el parque de Castelo, ubicado en A Coruña, Galicia, datado del año 2000.

El sector eólico español actualmente se encuentra en un momento crítico debido a la necesidad de modernizar y actualizar una gran parte de sus instalaciones. La Asociación Empresarial Eólica (AEE) aporta datos que indican que de los 30,5 GW de potencia instalada en el país, más de dos tercios habrán cumplido alrededor de dos décadas de funcionamiento antes del 2030. Frente a dicha situación, se han acordado diversos proyectos de repotenciación permitiendo sustituir los antiguos aerogeneradores por modelos más eficientes, optimizando la producción energética y reduciendo el impacto ambiental [5,6,7].

Algunos de los proyectos más significativos son en el parque eólico de Tahivilla (Cádiz), en el cual se sustituirán los noventa y ocho aerogeneradores por tan solo trece de última generación, incrementando la potencia de 78,4 MW a 84,4 MW. También se repotenciará el parque de Aldeavieja (Ávila) en el cual la empresa Endesa remplazará veintidós turbinas por tan solo cuatro, incrementando la potencia. De igual forma, en Galicia se llevará a cabo, en el parque de Castelo (A Coruña), que se reducirá de veinticinco aerogeneradores a tres y en los parques Novo, Monte Redondo y Somozas sustituyendo ciento setenta y dos por tan solo veintiocho [5,6,7,8,10].

Estos proyectos de repotenciación no solo incrementan la capacidad de generación de energía renovable en el país, sino que también evitan la construcción de nuevos parques. Con ello, se reduce la necesidad de construir en nuevos terrenos, aumentando la aceptación social y reduciendo el impacto medioambiental. Sin embargo, estas actividades generan un gran problema, la gestión de los residuos generados por el desmantelamiento de los aerogeneradores antiguos.

Figura 2. Parque eólico de Castelo, A Coruña [9].

Este desafío es una preocupación no solo local sino también global, concretamente, se alinea con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la ONU en la Agenda 2030, presentados en la *Figura* 3. El ODS número 7 indica que se tiene que garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna, lo cual está directamente relacionado con las iniciativas de repotenciación de los parques eólicos. Por otro lado, el ODS número 9 se centra en la industria, innovación e infraestructuras, promoviendo el desarrollo de soluciones tecnológicas para hacer frente a los desafíos ambientales. En el contexto de este trabajo, este objetivo implica investigar soluciones para el reciclaje de los materiales compuestos que se presentan como una necesidad urgente. En esta línea también se encuentra el ODS número 12, el cual se centra en la necesidad de una producción y consumo responsable, destacando la importancia de cerrar el ciclo de vida de los productos, implementando estrategias de economía circular y fomentando los diseños sostenibles. El reciclaje eficiente de palas de aerogenerador se convierte así en una acción clave [11]. Por último, el ODS número 13 resalta la urgencia de tomar medidas correctivas para mitigar los efectos del cambio climático. Aunque la energía eólica ya contribuye significativamente a la descarbonización, una correcta gestión de sus residuos refuerza su sostenibilidad y minimiza aspectos negativos medioambientales a largo plazo [11].

Incorporar estos objetivos en todas las etapas del ciclo de vida de los aerogeneradores, desde el diseño hasta el mantenimiento y desmantelamiento, permite mejorar su sostenibilidad ambiental y cumple con los compromisos globales de sostenibilidad.

Figura 3. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [11].

El problema principal de la producción de residuos es que incrementa la cantidad de desechos acumulados en los vertederos, contribuyendo a su saturación. Además, aquellos que no son gestionados adecuadamente afectan al ecosistema y la biodiversidad, como señala la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, por sus siglas en inglés) [12]. Asimismo, la liberación de sustancias toxicas puede afectar negativamente a la calidad del suelo y a los recursos híbridos. En concreto, muchos residuos industriales y tecnológicos, como las palas de los aerogeneradores, son fabricados con materiales compuestos como fibra de vidrio y resina, los cuales son difíciles de descomponer de forma natural. Estos materiales tardan siglos en desintegrarse y en el proceso liberan microplásticos contaminando el medio ambiente [13]. Por ello, los aerogeneradores desmantelados deben ser reciclados teniendo en cuenta los requisitos normativos y sociales de sostenibilidad y economía circular.

El proceso de reciclaje implica dividir el aerogenerador en sus componentes principales, es decir, la torre la góndola y el rotor, presentado en la *Figura* 4. La torre está fabricada principalmente con acero, él cual se funde con el objetivo de fabricar nuevos componentes metálicos y estructuras. Por su parte, la góndola contiene componentes mecánicos y electrónicos aprovechables para el mantenimiento de otros aerogeneradores, al presentar una diversidad de materiales entre los que destacan el acero, el aluminio y el cobre. Además, la base de hormigón puede ser empleada en la instalación de una nueva turbina o demolida. El rotor se divide en el buje y las palas. El buje está conformado en su totalidad por materiales compuestos, mientras que las palas presentan una combinación mayoritaria de materiales compuestos y otros materiales. De todas las partes del aerogenerador, el mayor reto al que se enfrentan las empresas encargadas de los parques eólicos es el reciclaje de las palas, debido a que la torre y la góndola pueden ser recicladas con relativa facilidad. Aunque existen diversas opciones de reciclaje de palas, muchas de ellas aún se encuentran en fase de investigación [4,9,15].

Hasta la fecha, el reciclaje de palas eólicas es un proceso complejo debido a la falta de entidades capacitadas para absorber eficientemente el volumen de residuos y transformarlos en subproductos

mediante métodos convencionales de reciclaje. Entre los procesos actuales, la mayoría implican una perdida significativa de material y un desaprovechamiento de las propiedades mecánicas, lo que subraya la necesidad de una mayor cooperación entre empresas, centros de investigación y administraciones públicas para desarrollar nuevos métodos más sostenibles que permitan una mejor recuperación del material [12]. Este tipo de cooperación es clave para cumplir los ODS mencionados anteriormente, integrando sostenibilidad e innovación en todos los niveles de la cadena de valor del sector eólico.

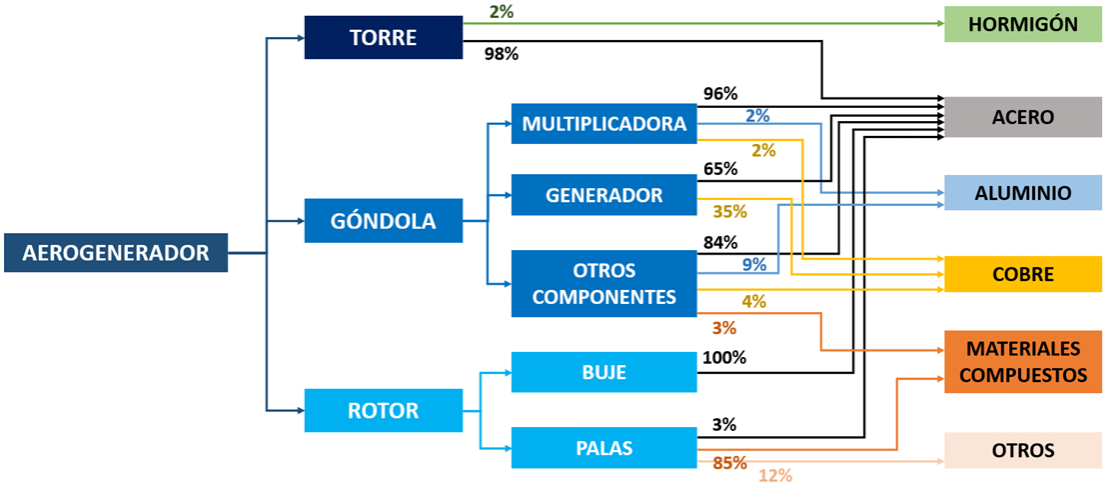

Figura 4. Composición en materiales de los principales componentes de un aerogenerador terrestre [15].

2.1. Estructura y composición de las palas de los aerogeneradores

Este trabajo, como presenta la *Figura 5*, se centra en los aerogeneradores con un eje horizontal, que en su mayoría cuentan con tres palas orientadas hacia el viento. Además, emplean torre tubular, que es el tipo de soporte estructural más común. Este diseño es el más empleado en los aerogeneradores modernos, ya que permite aprovechar la energía eólica de manera más eficiente.

Las hélices convierten la energía cinética y de presión del viento en energía mecánica. Estructuralmente, se pueden definir como vigas empotradas sometidas a diversas cargas aerodinámicas variables en el tiempo, debido a la naturaleza cambiante del viento. Estas incluyen fuerzas que provocan un par de rotación, fuerzas perpendiculares al rotor, y momentos torsores que la hacen girar sobre su eje. Asimismo, deben soportar otras fuerzas como su propio peso y fuerzas inerciales por el giro. Por ello, es importante contar con un diseño aerodinámico eficiente que minimice las cargas sobre las palas y prolongue su vida útil [13,14,15,18].

Dado que la vida media de un aerogenerador es de 20 a 25 años, es fundamental tener en cuenta el comportamiento de los materiales ante la fatiga. Las palas deben soportar alrededor de unos cien millones de ciclos de carga sin fallar, ya que están sometidas a esfuerzos constantes debido al viento y las fuerzas de rotación a lo largo de los años. Asimismo, según indica la bibliografía, los materiales, y como consecuencia las palas, deben soportar factores ambientales, además de las cargas ya

mencionadas. Son la parte más expuesta y vulnerable al impacto de rayos, partículas abrasivas transportadas por el viento e incluso a climas extremos debido a la altitud, soportando heladas. Todo ello, provoca grietas, rugosidad y disminución del rendimiento, es decir, reduce la vida útil de las palas [13,16,17].

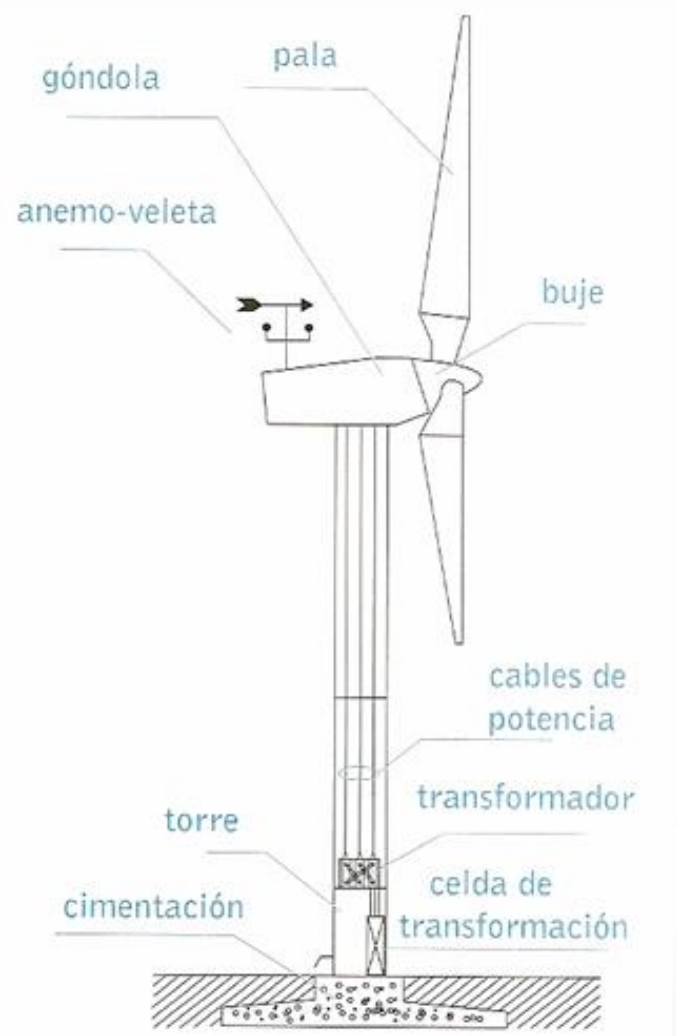

Figura 5.Componentes de un aerogenerador [19].

La *Figura 6* muestra la estructura que presentan, generalmente, las palas de aerogenerador. Esta se divide, desde la raíz hasta la punta, en tres zonas: interna, media y externa. La raíz está construida con resina reforzada, comúnmente con fibra de vidrio, y presenta una estructura cilíndrica. Por su parte, las zonas media y externa se conforman mediante una estructura tipo *sándwich* [17].

La configuración estructural tipo *sándwich* es la más eficaz y está formada por dos capas externas, llamadas pieles, unidas a un núcleo central ligero. Con este diseño se obtienen paneles de alta rigidez y bajo peso, superiores a las estructuras homogéneas [19]. Las pieles pueden estar fabricadas con fibras de vidrio, aramida o carbono, incorporadas en una matriz de poliéster, viniléster o epoxi. Por otro lado, el núcleo también tiene varias opciones de materiales como las espumas de poliuretano o núcleos hexagonales, más conocidos como *honeycomb* (nido de abeja), fabricados con materiales metálicos,

madera de balsa o papel [15,18]. Estas estructuras tipo *sándwich* son fundamentales por su combinación de rigidez y bajo peso, un aspecto crucial para el rendimiento y durabilidad. La rigidez es necesaria para resistir las fuerzas de torsión y aerodinámicas que se ejercen en la pala, mientras que el bajo peso reduce las tensiones mecánicas y mejora la eficiencia del generador. Además, este tipo de estructuras contribuye a la distribución de las cargas, permitiendo que las palas soporten más tiempo las fuerzas cíclicas sin comprometer su integridad [15,18].

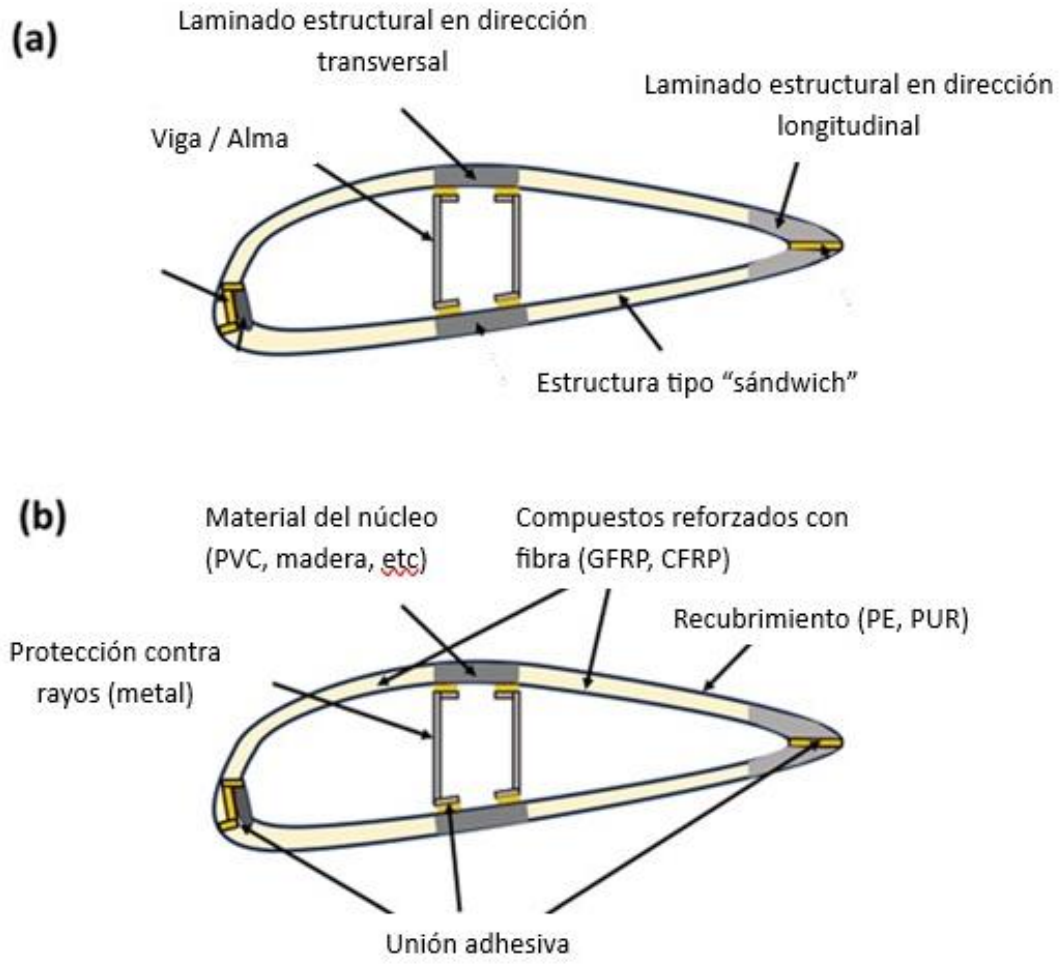

Figura 6. Diagramas esquemáticos de (a) la estructura y (b) los componentes principales de las palas de aerogenerador comúnmente utilizadas [17].

Las palas están compuestas mayoritariamente por una matriz polimérica, como puede ser resina epoxi o poliéster, reforzado con fibra, como de vidrio (GF), carbono (CF), o la combinación de ambas. La mezcla da como resultado una alta resistencia a la fatiga y excelentes propiedades mecánicas [17,18]. En términos de proporciones, contienen entre un 60-70 % en peso de fibras de refuerzo y entre un 30-40 % de matriz polimérica. Además, incorporan otros materiales en menor proporción como núcleos espumados y adhesivos, y materiales metálicos [15,17].

Los materiales compuestos permiten mejorar el diseño estructural de las palas, haciendo posible una mayor longitud y reducir el peso, optimizando su rendimiento aerodinámico y eficiencia energética [12]. Al estar formados por dos o más materiales con diversas propiedades, crean un material con mejores

características que dichos componentes por separado [19]. En este contexto, las palas de los aerogeneradores se fabrican fundamentalmente con fibras largas y rectas incorporadas en una matriz, quien se encarga de mantenerlas unidas y distribuir los esfuerzos. Principalmente, las fibras soportan la mayor parte de las cargas y la matriz mejora la resistencia y la fatiga. Su estructura se basa en laminados, donde la orientación de las fibras y la secuencia de apilado determinan las propiedades mecánicas. En general, los compuestos utilizados en la fabricación de las palas de aerogenerador pueden variar, pero principalmente están compuestos por la combinación de fibra de vidrio y resina epoxi debido a su relación beneficio-coste y sus propiedades conjuntas. La fibra de vidrio es económica y resistente, mientras que la resina epoxi destaca por su alta resistencia y durabilidad. Las fibras de carbono se emplean en aerogeneradores de mayor tamaño por su ligereza y resistencia, aunque su elevado coste limita su uso generalizado [13].

No obstante, una vez finalizada la vida útil de la pala, los materiales compuestos plantean grandes retos de reciclaje. El entrelazamiento de las fibras con la matriz durante el curado impide su separación. La fibra de vidrio no es biodegradable, y la resina es complicada de descomponer o reutilizar en otros procesos. Las técnicas convencionales de reciclaje son demasiado ineficaces en materiales compuestos, convirtiendo en un desafío la gestión de residuos, planteando un problema ambiental y económico en el sector eólico [13,17].

2.2. Métodos y tecnologías tradicionales para el reciclaje de las palas de aerogenerador

Las palas de aerogenerador están principalmente fabricadas en gran parte por materiales compuestos de fibra de vidrio (GFRP) y de carbono (CFRP), los cuales no tiene rutas de reciclaje eficaz sostenible [18]. En los últimos años, se ha investigado activamente los métodos existentes para la recuperación de estas fibras empleadas en los materiales compuestos termostables, con el objetivo de su posible reutilización [21].

Los principales métodos de reciclaje de polímeros reforzados con fibra (FRP) son el reciclaje mecánico, el térmico y el químico, presentado en la *Figura 7*. El reciclaje mecánico es una tecnología de uso generalizado para la recuperación de materias primas de compuestos poliméricos. El principal objetivo es reducir considerablemente el tamaño de los componentes y piezas, obteniendo un producto fibroso o en polvo para conseguir reutilizarlos. Los principales procesos empleados son la trituración y la molienda [21].

Los procesos de reciclaje térmicos, como puede ser la pirólisis o la combustión, se emplean para producir combustibles y fibras. Este proceso presenta mayores ventajas en comparación con los otros métodos al ser posible el manejo de materiales contaminados o sucios, y tiene la capacidad de procesar de manera eficiente variedad de compuestos poliméricos y a gran escala. No obstante, es un proceso costoso y su sostenibilidad ambiental es cuestionable [4].

Los procesos de reciclaje químico implican la despolimerización de los polímeros, es decir, romper los polímeros en secciones más pequeñas empleando reactivos de disoluciones químicas. Como productos se obtiene fibras, tanto de carbono (CF) como de vidrio (GF), y la matriz despolimerizada en forma de monómero o materia prima derivada del petróleo [17].

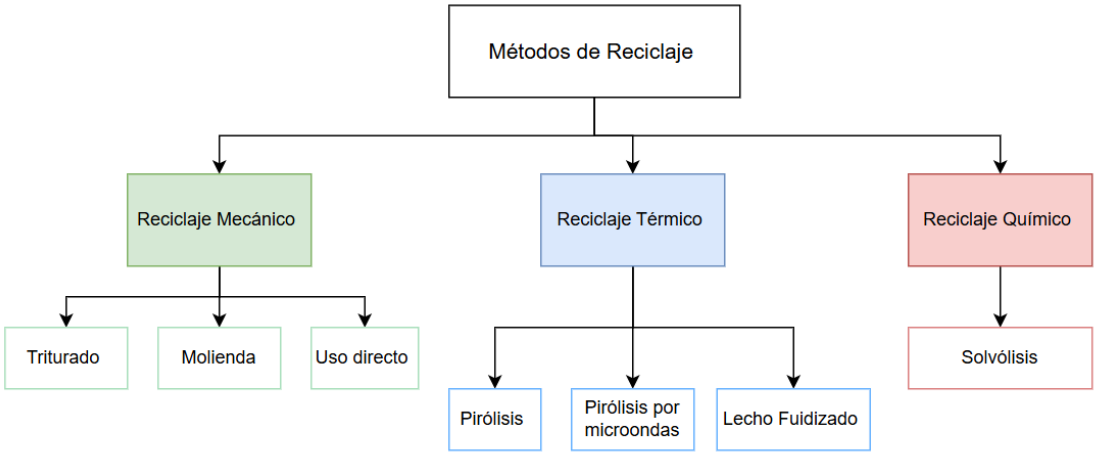

Figura 7. Métodos de reciclaje para materiales compuestos termoestables.

2.2.1. Reciclaje mecánico

El reciclaje que emplea métodos mecánicos tiene la capacidad de generar nuevas materias primas a través de tratamientos y la separación mecánica [21]. La tecnología empleada es simple al no alterar químicamente las propiedades de los materiales, permitiendo su reutilización directa. Algunos procesos son la trituración, la molienda y el tamizado [17].

La primera fase del proceso se centra en cortar, debido a su gran peso y volumen, obteniendo fragmentos más pequeños [21]. Al estar compuestas por polímeros reforzados con fibra, conservan buena resistencia permitiendo el aserrado lineal o el circular. El aserrado lineal enrolla un alambre de acero recubierto con diamantes sobre la hoja, permitiendo cortar piezas de diversos tamaños. Genera menos polvo, las incisiones son suaves y el borde está bien definido. Por otro lado, el aserrado circular puede emplear variedad de sierras circulares, desde modelos portátiles hasta algunas accionadas de manera hidráulica. Para obtener el tamaño deseado, se necesitan realizar múltiples cortes, produciendo grandes cantidades de polvo [17].

Dependiendo del tipo de corte y la zona en la que se realice, se pueden obtener distintos resultados en la transformación del residuo en mobiliario urbano. Se han realizado varios proyectos transformándolos en parques infantiles, paradas de autobús, asientos públicos e incluso barreras acústicas [22]. La empresa *Superuse Studios* diseñó en 2008 un parque infantil en la ciudad de Rotterdam, Países Bajos, debido a la necesidad de remodelar el anterior (*Figura 8*). Emplearon cinco palas de una turbina eólica situándolas alrededor de una losa de hormigón ya existente, creando una zona de juego [23]. En la misma ciudad, se han construidos asientos públicos utilizando nueve palas con distintos ángulos (*Figura 9*) [24] y en Aalborg, Dinamarca se han empleado para la construcción de techos de estacionamiento de bicicletas [25]. Con esta metodología de reciclaje se consigue la reutilización directa de los residuos reduciendo los envíos al vertedero, al mismo tiempo que minimizar el uso de los materiales originales que serían empleados para construir estas estructuras. Este método tiene un uso limitado y se consumen un numero bajo de palas, siendo un método ineficaz para la reutilización a gran escala [17]. Una vez las estructuras del mobiliario urbano se han cortado, siguen

existiendo residuos de palas que pueden ser triturados y empleados como materiales en la construcción. Dependiendo del tamaño de las partículas, los usos varían. Cuando el tamaño de las partículas es superior a 25 mm, se emplean para suelos agrícolas y tableros de cemento ligeros, mientras que cuando el tamaño está entre 3 y 9 mm, se emplean como material de cobertura y material aislante acústico. En el caso de que las partículas tengan un tamaño entre 1 mm y 50 µm, se introducen en un molino de alta velocidad consiguiendo separar la resina de la fibra. Aunque la fibra puede reutilizarse, las propiedades mecánicas se ven degradadas por los restos de resina que no fueron posibles de separar. Este desafío, muestra la necesidad de continuar trabajando en la investigación de métodos de reutilización de compuestos poliméricos, como la fibra de vidrio, lo que permitirá un reciclaje a gran escala [17].

Figura 8. Parque infantil en la ciudad de Rotterdam, Países Bajos fabricado con palas de aerogenerador [24].

Figura 9. Mobiliario urbano fabricado con palas de aerogenerador en Rotterdam, Países Bajos [24].

Algunas investigaciones [26] trituraron las palas de GFRPCs obteniendo fragmentos delgados y alargados denominados “agujas”. Posteriormente las mezclaron con hormigón en una proporción de 5

% y 10 % en volumen. Los resultados no mostraron efectos negativos sobre la estabilidad ni la trabajabilidad del nuevo hormigón, así como tampoco sobre su resistencia a la tracción, compresión y flexión. Además, la capacidad de absorción de energía aumentó significativamente, pasando de 1,2 julios a 33,3 julios con la sustitución del 10 % del material por las agujas [21].

Por otro lado, en el estudio [27] se trituran las palas en compuestos triturados y fibras de vidrio, transformadoras en nuevos componentes con la intención de reemplazar parcialmente a las GF originales. Asimismo, otro estudio [28] exploro el uso de fibras corta recicladas de GFRPCs para fabricar nuevos compuestos. El proceso se centró en la molienda mecánica y las fibras recuperadas se incorporaron en matrices de polipropileno de un 40 % de contenido en peso, ionómero con fibra de carbono (20 % en peso) y aramida con ionómero (15 % en peso). Además, estudiaron el tamaño de las fibras y el contenido residual de resina epoxi. Ambos estudios mostraron la viabilidad de los compuestos reciclados [21].

En términos generales, el método mecánico puede reciclar los materiales compuestos, pero reduce significativamente su valor. Asimismo, los otros materiales de los que se componen las palas como la madera balsa o PVC no son tratados eficientemente. La forma cóncava y el grosor desigual que presentan las palas dificulta el corte de pieza uniformes, demandado más energía y provocando excesivo polvo y ruido. Todo ello conduce a escasos beneficios económicos y limita la aceptación del reciclaje mecánico [17].

2.2.2. Reciclaje térmico

En la actualidad, el reciclaje térmico se ha consolidado como una alternativa viable y eficiente para el tratamiento de las palas de aerogenerador al final de su vida útil. Las principales técnicas a gran escala para materiales compuestos reforzados con fibra (FRPC) son la pirólisis [17].

La metodología empleada se basa en el calentamiento externo para descomponer los compuestos de los residuos, recuperando productos con valor añadido, como combustibles líquidos y gaseosos, productos químicos, y fibras tanto de vidrio (GF) como de carbono (CF) [21]. Gracias al alto poder calorífico de los polímeros, estos residuos pueden ser convertidos también en electricidad u otras formas de energía [29].

En condiciones de ausencia de oxígeno [29] y temperaturas, normalmente, entre 400 y 700 °C [21], la pirólisis descompone la matriz polimérica en gases, líquidos y sólidos, permitiendo su uso como combustibles, productos químicos o materiales industriales. Además, no se requiere el uso de pretratamientos complejos, como el triturado, presenta un consumo energético menor que otras técnicas [17] y es un método menos destructivo [30].

Sin embargo, uno de los principales retos que presenta la pirólisis es la formación de residuos carbonizados en la superficie de las fibras, reduciendo su capacidad de adhesión en nuevos compuestos. Entre las soluciones destacan propuestas que se centran en el uso de vapor de agua o dióxido de carbono para limpiar dichas fibras, así como emplear atmosferas parcialmente oxidantes como puede ser nitrógeno con un 5 % de oxígeno [21].

Diversos tipos de reactores, como los de lechos fijos, lechos fluidizados o hornos rotativos, han sido desarrollados con este fin, cada uno con distintas ventajas operativas. Por ejemplo, el lecho fluidizado ofrece un calentamiento más uniforme y una menor huella de carbono, aunque con un mayor coste y requiere un tamaño de partícula más reducido. Parámetros como la temperatura de reacción, recomendado entre 500 y 550 °C [17]. El tiempo de residencia y el ambiente de reacción tienen una gran influencia en la degradación de las fibras recuperadas [29].

Aunque las propiedades mecánicas de las GF pueden verse afectadas, la conductividad térmica permanece comparables a la de los materiales comerciales, pudiendo ser empleadas como aislante térmico o acústico [17]. No obstante, la pirólisis para las GF presenta una barrera económica, tanto por su bajo coste de producción como por la pérdida significativa de propiedades, lo cual compromete la rentabilidad del proceso [21].

Pese a estos desafíos técnicos y económicos, como la emisión de contaminantes, la complejidad de los productos obtenidos y los altos costes operativos, este tipo de reciclaje sigue siendo una de las soluciones más prometedoras para la gestión sostenible de los residuos de las palas de aerogenerador [17].

2.2.3. Reciclaje químico

El reciclaje químico es considerado uno de los métodos más prometedores para el reciclaje de las palas de aerogenerador al final de su ciclo de vida. Este método, también conocido como solvólisis, degrada la matriz polimérica empleando disolventes o reactivos, con o sin catalizadores, obteniendo como resultado productos químicos útiles [17]. Además, se recuperan fibras limpias con propiedades cercanas a las vírgenes y en algunos casos, se puede reutilizar parte de la matriz descompuesta para sintetizar nuevas resinas. Es una alternativa eficaz para recuperar materiales de alto valor [31].

La solvólisis se realiza en condiciones, generalmente, de fluidos subcríticos o supercríticos, donde tiene lugar la despolimerización de las resinas termoestables, en monómeros u oligómeros. Bajo tales condiciones, el disolvente rompe enlaces específicos y elimina la unión cruzada entre resina y fibra, favoreciendo la separación y recuperación de los materiales [17]. La solvólisis bajo estas condiciones permite una mayor eficiencia en la degradación de la matriz, pero requiere temperaturas y presiones elevadas, derivando en el uso de equipos costoso y elevado consumo energético. Además, los productos generados son complejos y difíciles de valorizar directamente. Esta situación ha impulsado la búsqueda de alterativas más económicas y sostenibles [31].

Pese a los retos, existen algunas iniciativas por parte de empresas como *Extracthive,* que aplica la solvólisis para reciclar compuestos CFRP, obteniendo fibras largas e incluso tejidos con propiedades mecánicas similares a las originales [31].

Según la bibliografía [32], los métodos químicos como oxidación, solvólisis o alcohólisis permite despolimerizar selectivamente los enlaces específicos presentes en las resinas epoxi, constituyen la opción mayoritariamente empleada en las palas de aerogenerador. Con ello, se permite la recuperación

de las fibras con un 85 % hasta el 99 % de la resistencia original de las fibras, siendo esencial para la viabilidad del proceso.

El proceso químico se realiza normalmente con disolventes como agua, glicoles o cetonas, y pueden realizase pretratamientos mecánicos para mejorar la eficiencia de la reacción [17]. Estudios [33] han demostrado que puede emplearse rutenio (Ru) como catalizador para resinas epoxi termostables y curadas con amina sin modificar, así como a compuestos comerciales como las palas de aerogenerador. Este catalizador reduce el tiempo de procesamiento, se realiza bajo condiciones de temperatura y presión relativamente bajas. Sin embargo, esta tecnología innovadora todavía no se puede emplear de manera industrial dado que el Ru es un metal de elevado coste y de escasa disponibilidad. Ello ha motivado a investigadores a desarrollar sistemas catalíticos más eficientes y asequibles [17].

Si bien la solvólisis ha demostrado ser rentable para compuestos CFRP, estudios recientes han revelado que también puede ser viable económicamente para los compuestos GFRP, siempre que se consiga recuperar tanto la resina como las fibras [31]. El principal problema de los compuestos GFRP radica en su bajo valor económico, dado que, en términos generales el coste total del proceso de reciclaje debe ser inferior al valor original del producto. Actualmente, se están explorando otras vías, como el calentamiento con microondas, que se presenta como una opción viable desde el punto de vista técnico, pero es todavía una tecnología en desarrollo [17].

Todo ello provoca que el reciclaje químico sea un método viable y cada vez más optimizado para la recuperación de los materiales de las palas. Sin embargo, sigue enfrentándose a desafíos como la viabilidad económica, impacto ambiental y escalabilidad industrial.

2.3. Normativa vigente del reciclaje de palas

El proceso de reciclaje y reutilización de palas debe seguir una serie de normativas y leyes establecidas en el ámbito nacional, así como aquellas propuestas por la Unión Europea. En este aspecto, el marco legal garantiza el tratamiento adecuado de las palas al final de su ciclo de vida, impulsando actividades sostenibles que favorezcan la economía circular y la reducción del impacto en el medio ambiente [34].

La Directiva 2008/98/CE sobre los residuos, también denominada Directiva Marco de Residuos, determina el marco legal sobre la gestión de los residuos dentro de la UE y promueve la economía circular. En ella se tratan aspectos claves relacionados con la reutilización y reciclajes de las palas [35]. Esta directiva tiene un impacto significativo en la gestión de las palas de aerogenerador, ya que establece la jerarquía de residuos que prioriza la prevención, reutilización y reciclaje por encima de la eliminación, como indica la *Figura 10*. De ese modo, se impulsa el uso de materiales reciclables en el proceso de fabricación de nuevas palas, así como la oportunidad de reincorporarlos al ciclo productivo a través de la reutilización en mobiliario urbano o infraestructuras. Asimismo, se potencia la valorización energética, empleando las palas como combustible en cementeras. La eliminación se considera la actividad menos recomendada, limitando los residuos municipales enviados a vertedero a tan solo un 10 % para 2035, promoviendo la búsqueda de rutas más eficientes para el reciclaje. Todo ello, provoca

un aumento sobre la responsabilidad de los productores en la gestión de los residuos, incentivando económicamente a aquellos que inviertan en soluciones de reciclaje [35].

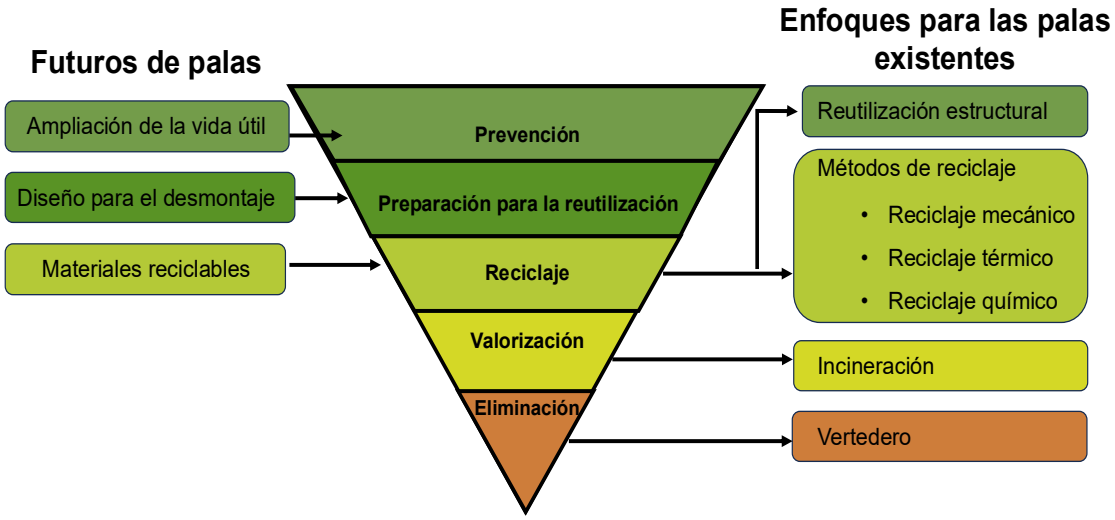

Figura 10. Jerarquía de la gestión de residuos según la Directiva 2008/98/CE [36].

Por otro lado, el Reglamento (UE) 2020/852 del Parlamento Europeo y del consejo [37], conocido comúnmente como Reglamento de Taxonomía, establece las bases para determinar si una actividad económica es ambientalmente sostenible dentro de la Unión Europea. Con ello, se facilita el objetivo de destinar inversiones hacia actividades que contribuyan a la sostenibilidad ambiental y favorezcan el desarrollo hacia una economía descarbonizada.

La actividad económica, en este caso, el reciclaje de las palas de aerogenerador debe contribuir sustancialmente a uno de estos seis objetivos medioambientales establecidos por el Reglamento:

1. *Mitigación del cambio climático*
2. *Adaptación al cambio climático*
3. *Uso sostenible y la protección de los recursos hídricos y marinos.*
4. *Transición hacia una economía circular*
5. *Prevención y control de la contaminación*
6. *Protección y recuperación de la biodiversidad y los ecosistemas*

El objetivo número cuatro es la base del reciclaje al centrarse en la disminución del uso de materias primas y en aumentar el ciclo de vida de los productos potenciando la reutilización, la reparación, el reciclaje y la valorización. Fomenta la recuperación de las materias primas, como la fibra de vidrio o la resina epoxi, consiguiendo la reincorporación de ellos en nuevos procesos productivos, minimizando los residuos y maximizando la eficiencia de los recursos. Con todo ello, además, se reducen las emisiones de efecto invernadero, como el CO_2. El cumplimiento de al menos uno de estos objetivos es fundamental para conseguir que el reciclaje de las palas de aerogenerador sea una actividad sostenible y aporte valor a la sociedad.

Finalmente, dicha actividad no debe provocar un daño significativo en ninguna de las otras área u objetivos (principio DNSH, *Do No Significant Harm*) y debe cumplir con los criterios técnicos establecidos en los actos de delgados de la Comisión Europea [37]. Por ello, las técnicas de reciclaje de palas no deben generar contaminación adicional que pueda perjudicar aspectos ambientales.

La Ley 22/2011, del 28 de julio, sobre los residuos y el suelo contaminado [38], tiene especial relevancia en el ámbito del reciclaje de palas de aerogeneradores en España al establecer responsabilidades específicas para los productores de residuos. En comparación con la normativa europea, esta ley establece un esquema regulador a nivel nacional centrado en la gestión y el reciclaje de residuos industriales. El artículo 17, define la responsabilidad del productor, obligando a los fabricantes y operadores de aerogeneradores a encargarse de la gestión debida de las palas al final del ciclo de vida. Este compromiso implica la obligación de invertir en la investigación y desarrollo de métodos de reciclaje, así como de garantizar la gestión de los recursos, conforme a la jerarquía de recursos.

Adicionalmente, también regula la gestión de suelos contaminados, relevante si se consideran los posibles efectos que pueden causar la incorrecta eliminación de las palas, pudiendo liberar sustancias dañinas al medio ambiente. El objetivo de esta ley es asegurar la correcta gestión de los residuos, minimizando el riesgo de contaminación de los posibles medios, como el suelo o el agua [38].

Además de estas normativas, existen otras que complementan esta información, siendo relevantes en el reciclaje de las palas de aerogenerador, tales como el Reglamento (UE) 305/2011, sobre productos de construcción [39], que puede influir en el uso de materiales reciclados en componentes estructurales. A pesar de que la Directiva 2012/19/UE [40], sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), no aplica directamente sobre las palas, contiene directrices relevantes sobre el diseño del reciclaje y responsabilidad de los productores. En el ámbito nacional, la Estrategia Española de Economía Circular (España Circular 2030) [41] y el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) [42] aportan una guía para impulsar la economía circular y la gestión sostenible de los recursos industriales.

Por lo tanto, tanto el reciclaje como la reutilización de las palas de aerogenerador están regulados por un marco normativo europeo y nacional, promoviendo la sostenibilidad ambiental y la economía circular. La Directiva 2008/98/CE establece los principios de la jerarquía de residuos, anteponiendo la prevención, reutilización y reciclaje. Asimismo, el Reglamento (UE) 20207852 establece los criterios que deben cumplir las actividades para ser consideradas sostenibles, coordinándolos con los objetivos ambientales de la UE, como la atenuación del cambio climático y la gestión de los recursos naturales. Adicionalmente, la Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados, establece la gestión de residuos industriales en el ámbito nacional, estableciendo responsabilidad especificas a los productores de los residuos generados, en este caso los operadores de aerogeneradores, con el fin de asegurar la correcta gestión de los residuos. Además, impulsa el desarrollo de nuevos métodos de reciclaje. Con ello, además de impulsar las prácticas de reciclaje eficiente, también se contribuye a la transformación hacia la economía circular y descarbonización, reforzando el compromiso europeo y de las empresas con la sostenibilidad a largo plazo.

3. Objetivos

Este trabajo se centra en analizar y comparar las distintas rutas disponibles para el reciclaje de las palas de aerogeneradores, con el fin de identificar cuáles presentan un mejor desempeño ambiental y económico. El objetivo principal es aportar una visión crítica y técnica sobre el final del ciclo de vida de estas palas, que suponen uno de los mayores desafíos ambientales del sector eólico.

Las palas de aerogenerador están fabricadas con materiales compuestos que, si bien ofrecen ligereza y resistencia durante su funcionamiento, presentan importantes dificultades para su reciclaje. Actualmente, muchas de estas palas son depositadas en vertederos, lo cual contradice los principios de la economía circular.

En este contexto, el trabajo analiza las principales tecnologías de reciclaje disponibles, desde métodos mecánicos hasta térmicos y químicos, evaluando su viabilidad técnica, su impacto ambiental y los costes asociados. Con ello, se pretende contribuir al desarrollo de soluciones más sostenibles para la gestión del fin de vida de estas infraestructuras.

Para llevar a cabo el objetivo general del presente trabajo, se han definido una serie de objetivos específicos, que pueden dividirse en los siguientes:

- Estudio del contexto actual de la energía eólica y el problema ambiental asociado a la gestión de residuos de palas.
- Análisis de los materiales que componen las palas y de los retos que suponen para el reciclaje.
- Identificación y descripción de las principales rutas de reciclaje disponibles: mecánica, térmica y química.
- Evaluación del impacto ambiental de cada ruta de reciclaje mediante el análisis del consumo energético, las emisiones de gases de efecto invernadero, aquellas evitadas respecto a la fabricación con materiales vírgenes, y las condiciones de recuperación de las fibras.
- Estimación de los costes económicos asociados a cada tecnología de reciclaje.
- Comparación entre alternativas para determinar las más sostenibles desde un enfoque ambiental y económico.

4. Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo se sigue una metodología basada en el análisis documental y en la comparación técnica y económica, lo que permite abordar los objetivos planteados. A continuación, se detallan las etapas seguidas y las herramientas empleadas. La *Figura 11* representa un esquema del proceso realizado para llevar a cabo el presente estudio.

En primer lugar, se lleva a cabo una revisión de la bibliografía disponible, incluyendo fuentes técnicas e informes del sector eólico, con el fin de recopilar información detallada sobre las palas de los aerogeneradores. Esta revisión tiene como objetivo recopilar información detallada y actualizada sobre las características técnicas de las palas de aerogeneradores, su vida útil promedio, y los retos que plantea su gestión al final de dicha vida útil.

En base a la información recopilada, se realiza un estudio sobre la situación actual de los parques eólicos en España, tomando como referencia datos oficiales de instituciones como la Asociación Empresarial Eólica (AEE). Este análisis se orienta a identificar la antigüedad de los aerogeneradores en funcionamiento y los proyectos de retirada o repotenciación de equipos obsoletos. El objetivo principal es generar una referencia del volumen potencial de palas que alcanzarán el final de su vida útil en los próximos años, lo que resulta fundamental para dimensionar la necesidad de soluciones de reciclaje a medio y largo plazo.

Una vez contextualizado el problema, se procede a identificar y clasificar las principales tecnologías de reciclaje de palas de aerogeneradores. Estas se agrupan en tres grandes categorías: mecánicas, térmicas y químicas. Para cada tipo de tecnología, se realiza un análisis detallado que incluye su funcionamiento, su grado de madurez tecnológica, así como sus principales ventajas y limitaciones, y requisitos operativos.

Con el propósito de evaluar la sostenibilidad de cada alternativa de reciclaje, se recopila y analiza información relacionada con el impacto ambiental. Este análisis contempla diversos aspectos, entre los cuales destacan el consumo energético, las emisiones contaminantes que se generan durante su implementación, el crédito que no se consume ni se genera por el reciclaje de materiales, así como la cantidad y calidad de los residuos resultantes del proceso. Esta aproximación permite identificar con mayor claridad los efectos ambientales asociados a cada método. En cuanto a la evaluación económica, se estiman los costes asociados a cada estrategia de reciclaje propuesta. El análisis incluye costes operativos, aquellos relacionados con la infraestructura necesaria, el transporte de materiales y el tratamiento final de los residuos. Con ello se logra una visión más completa que combina los criterios ambientales y económicos, favoreciendo una toma de decisiones más equilibrada y fundamentada.

A partir de esta información, se elabora una comparativa que sintetiza los resultados ambientales y económicos de cada tecnología de reciclaje. Este análisis permite identificar las opciones más sostenibles y viables para la gestión de palas al final de su vida útil, en la actualidad.

Una vez realizada la comparativa de las distintas tecnologías de reciclaje disponibles, y tras identificar sus respectivos puntos fuertes y limitaciones, se decide profundizar en el estudio del reciclaje mecánico, considerado como una de las opciones más viables en el contexto actual, tanto desde una perspectiva técnica como económica y ambiental. Se lleva a cabo un análisis detallado que combina diferentes herramientas. En primer lugar, se aplica un análisis DAFO, que permite identificar los factores internos y externos que inciden en su desarrollo. Posteriormente, se recurre al análisis PESTEL, con el propósito de explorar de forma más amplia el entorno en el que se desarrollaría esta tecnología. Con el objetivo de obtener una perspectiva más completa del impacto ambiental del reciclaje, se elabora la Matriz de Leopold. Examina el impacto de activa del que conlleva el proceso en aspecto como el suelo, la salud humana, el aire y los ecosistemas. Finalmente, el análisis se complementa con una evaluación del grado de alineación del reciclaje mecánico con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En conjunto, todos los análisis proporcionan una visión más completa del reciclaje mecánico.

Como último apartado, se analiza la viabilidad de extender la vida útil de las palas eólicas, con el objetivo de retrasar, en la medida de lo posible, la necesidad de recurrir al reciclaje. Esta estrategia se plantea como una alternativa complementaria. El análisis comienza con un estudio del proceso requerido para evaluar el estado estructural y funcional de las palas. Una vez realizada esta evaluación, se procede a analizar la posibilidad de llevar a cabo acciones correctivas, tales como reparaciones puntuales o el refuerzo de aquellas zonas que presenten mayores niveles de desgaste, fatiga o daño.

En cuanto a las herramientas empleadas, el desarrollo del trabajo se ha apoyado exclusivamente en el uso de Microsoft Excel para la organización de datos y la realización de cálculos comparativos.

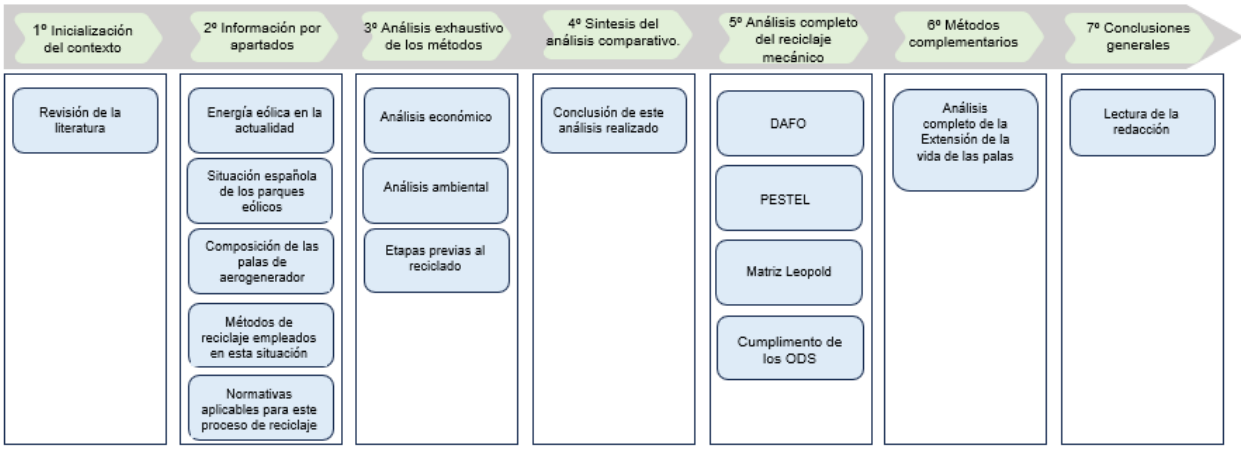

Figura 11. Etapas del proceso de realizado para el presente estudio.

5. Resultados y discusión

En esta sección se lleva a cabo un análisis comparativo de los principales métodos de reciclaje empleados en el tratamiento de palas de aerogeneradores al final de su vida útil. El objetivo es identificar cuál de ellos presenta una mayor viabilidad desde el punto de vista ambiental y económico. Para ello, se ha realizado un estudio basado en revisión de literatura científica y técnica, evaluando distintos enfoques que han sido propuestos y aplicados en la gestión del residuo compuesto que representan estas palas.

El análisis se centra en cinco métodos principales: vertedero, reciclaje mecánico, lecho fluidizado, pirólisis y solvólisis. A partir de diferentes fuentes, se han recopilado datos relativos a las emisiones de gases de efecto invernadero, consumos energéticos, rendimientos del materiales y costes asociados a cada proceso. Estos valores permiten construir una comparación más clara entre las alternativas, teniendo en cuenta no solo su funcionamiento técnico, sino también su impacto ambiental y su proyección económica.

5.1. Análisis preliminar de materiales y contexto

5.1.1. Análisis de la composición de las palas

Se han analizado las diferentes posibilidades en cuanto al tipo de fibra empleada en la fabricación de palas de aerogenerador: fibra de vidrio (GF), fibra de carbono (CF) o una composición híbrida. La *Figura 12* muestra las fibras que se emplean para la fabricación de las palas. Actualmente, la GF representa la mayor parte de la producción mundial de fibras en este sector, lo que significa que el volumen de residuos de GFRP para reciclaje es mayor en comparación con el de CFRP [43]. Las palas desmanteladas con CFRP aún son poco comunes, pero se espera un aumento significativo en los próximos cinco a quince años, a medida que sean remplazadas por repotenciación o porque lleguen al final de su vida útil [36].

A pesar de que la mayoría de los estudios se han enfocado en el reciclaje de residuos de CFRP, motivados por su alto precios y su mayor capacidad para mantener las propiedades mecánicas después del reciclaje, el presente trabajo se centra en el análisis de los residuos de GFRP.

La fibra de vidrio virgen (E-glass) tiene un coste aproximado de entre 1 y 2,5 €/kg [36,44,45]. El bajo precio de la fibra virgen hace complicado la obtención de beneficios económicos del reciclaje, al tener que ser la suma de los costes del proceso menores que el valor de mercado de la fibra virgen.

Figura 12. Material de fibra de vidrio (izquierda) [46] y fibra de carbono (derecha) [47].

5.1.2. Estado actual del reciclaje de materiales compuestos

Los métodos de reciclaje y recuperación presentan diversos niveles de madurez tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés) que van del 1 al 9, explicados en la *Tabla 1*. Dicha escala mide el grado de desarrollo de la tecnología desde su fase más inicial en el laboratorio hasta su uso comercial a gran escala [44,48].

En lo que respecta al reciclaje de fibra de vidrio, las opciones más consolidadas a nivel industrial son la incineración y la disposición en vertedero, ambas ampliamente implantadas y disponibles comercialmente, lo que justifica su nivel de madurez tecnológico de 9. El reciclaje mecánico ha sido probado en entornos precomerciales y piloto, alcanzando un TRL 8, lo que indica un alto grado de desarrollo y viabilidad técnica. En cambio, tecnologías más avanzadas o emergentes, como la pirólisis térmica, presentan un TRL 7, al haber sido implementadas en plantas piloto, pero aún requieren mejoras y optimización para su adopción comercial generalizada. En el caso del lecho fluidizado y la solvólisis, ambos se encuentran en etapas tempranas de desarrollo, con un TRL 4, ya que sus aplicaciones en el tratamiento de materiales compuestos han sido limitadas a ensayos de laboratorio. Por ejemplo, en la solvólisis, los estudios existentes muestran variabilidad significativa en las condiciones de operación y resultados, lo que dificulta su comparación y extrapolación a escala industrial. Diversas tecnologías en fases aún más tempranas, como la pirólisis asistida por microondas (MAP) y la fragmentación por alto voltaje (HVF), se encuentran en un TRL 3, lo que indica que apenas han superado la fase experimental básica. En estos casos, la escasa disponibilidad de datos y la falta de validación más allá de condiciones de laboratorio justifican que estas rutas no se incluyan dentro del alcance del presente trabajo [44,48].

Es importante destacar que más de la mitad de estas tecnologías a estudio solo han sido demostradas, para materiales compuestos como la fibra de vidrio y la resina epoxi, en el laboratorio o en condiciones controladas. La menor incertidumbre se da en el vertedero, mientras que la mayor se produce para la solvólisis, seguida por el lecho fluidizado. La incertidumbre de estos métodos va desde los resultados obtenidos hasta los parámetros del proceso, como puede ser la temperatura y la presión, incluso en los productos recuperados.

Tabla 1. Nivel de madurez tecnológica (TRL) [48].

Nivel TRL	Descripción
TRL 1	Principios básicos observados (investigación fundamental)
TRL 2	Concepto tecnológico formulado
TRL 3	Prueba experimental de concepto en laboratorio
TRL 4	Validación de tecnología en entorno de laboratorio
TRL 5	Validación en entorno relevante (más realista, pero aún controlado)
TRL 6	Demostración en entorno relevante (prototipo en condiciones simuladas reales)
TRL 7	Demostración en entorno real (piloto funcional)
TRL 8	Tecnología cualificada y probada (ya se puede fabricar en condiciones reales)
TRL 9	Tecnología comprobada en operación real comercial

5.2. Métodos seleccionados para el estudio

5.2.1. Incineración

La incineración es una forma de combustión controlada, empleada como método de desecho para materiales no reciclables. Se puede generar calor o electricidad mediante dicha quema, pero una de las principales desventajas del proceso es la producción de subproductos.

Antes de la combustión, los residuos de GFRP requieren un pretratamiento que incluye triturado y mezcla con combustibles sólidos, lo que implica un consumo energético estimado en 0,144 MJ de electricidad por kilogramo de residuo, incrementando el precio del proceso [49].

El proceso consigue la combustión de la matriz polimérica del GFRP. Sin embargo, la fibra de vidrio, al estar compuesta de materiales minerales, no reaccionan con el oxígeno ni liberan energía, por lo que permanecen como residuos sólidos en forma de ceniza, generando alrededor de 0,87 kg por cada kg de residuo incinerado. De esta cantidad, el 83,5 % se destina como sustituto de áridos y el 16,5 % restante se envía al vertedero [18,42,49]. Además de estos subproductos sólidos, la incineración genera emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2, NO_x), así como contaminantes peligrosos como los compuestos orgánicos volátiles (COV_s) y partículas en suspensión [50].

Desde el punto de vista energético, las resinas poseen un poder calorífico de aproximadamente 30 MJ/kg. No obstante, debido a la composición global de las palas, entre 60 y 70 % de fibra y un 30 y un 40 % de resina, la energía recuperable se estima en 7,3 MJ/kg de residuo de GFRP. Esta energía no se convierte íntegramente en formas útiles, ya que la eficiencia de recuperación energética en la planta de incineración se estima en un 21 % para electricidad y un 8 % para calor útil. En términos prácticos, esto implica que de los 7,3 MJ/kg disponibles, solo se recuperan aproximadamente 1,53 MJ en forma de electricidad y 0,58 MJ en forma de calor, demostrando las limitaciones del proceso de incineración como método de valorización energética para este tipo de residuos. Gracias a la generación de energía

y los áridos, contemplados como sustitutos de materiales extraídos en canteras de grava y arena, se obtiene un beneficio ambiental indirecto [49].

Desde el punto de vista económico, el coste estimado de la incineración de residuos industriales de bajo poder calorífico es de aproximadamente 151 €/t en Bélgica, ya que no se han encontrado valores específicos para España. Esta cifra incluye tanto el impuesto ambiental como el coste de disposición de la ceniza de fondo [49].

En conjunto, aunque la incineración permite una valorización energética parcial de GFRP, así como una cierta recuperación de materiales en forma de cenizas o residuos minerales, esta opción presenta importantes limitaciones. Su eficiencia energética es relativamente baja, especialmente si se compara con otras rutas de reciclaje emergentes, y una parte significativa del contenido material se pierde en forma de emisiones o residuos no reutilizables. Además, el proceso genera subproductos contaminantes, como gases de combustión que pueden contener compuestos tóxicos lo que implica la necesidad de sistemas de tratamiento adicionales y eleva el impacto ambiental general del proceso. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, la incineración no contribuye de manera significativa al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente aquellos relacionados con la producción y consumo responsables (ODS 12), la acción por el clima (ODS 13), y la protección de los ecosistemas terrestres (ODS 15). De hecho, este método se considera más una solución de eliminación que de reciclaje, ya que no favorece la circularidad de los materiales ni el aprovechamiento eficiente de los recursos.

Por todo lo anterior, y considerando además que existen alternativas con un mayor potencial de recuperación de recursos y con un impacto ambiental comparativamente menor, el método de incineración para la gestión de residuos GFRP procedentes de las palas de aerogenerador no será considerado dentro del alcance del presente trabajo.

5.2.2. Vertedero

El vertido se encuentra en la parte inferior de la jerarquía de residuos como muestra la *Figura 10*. A pesar de ser una de las opciones menos sostenibles, sigue empleándose en la gestión de los residuos GFRP. Es una opción barata en la cual las fibras no se recuperan y causa un gran impacto ambiental, a pesar de no producir emisiones toxicas [51] y tener un consumo de energía limitado (0,26 MJ/kg) [18,52].

El vertedero representa una pérdida económica al ocupar espacio significativo y no recuperar los materiales, es decir, no contribuye a la economía circular. La *Figura 13* muestra como son enterradas las palas en los vertederos. En muchos países de Europa, como puede ser Alemania, Países Bajos y Finlandia, ya se están imponiendo leyes para la prohibición de la eliminación de residuos compuestos en vertederos [52]. No se han encontrado datos sobre el coste del vertedero en Galicia, pero para la comunidad autónoma de Cataluña, entre otras, se estima un precio de entre 30 y 50 € por tonelada, al cual se le aplica un impuesto adicional de 53 € por tonelada [53,54,55]. Sin embargo, fuera de España, concretamente en Bélgica, la tarifa de vertido asciende a aproximadamente 181 € por tonelada, lo que

incluye una tarifa de entrada promedio de 51 € por tonelada y un impuesto ambiental de 130 € por tonelada [49].

El vertido en vertedero será considerado como referencia tradicional, con el objetivo de compararlo, a lo largo del estudio, con las alternativas tecnológicas actuales en la gestión de residuos compuestos.

Figura 13. Vertedero de las palas de aerogenerador [57].

5.2.3. Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico hace referencia al proceso de reducción del residuo de FRP (polímeros reforzados con fibra) a partículas más pequeñas mediante la trituración y molienda, obteniendo productos ricos en resina y en fibra que pueden ser utilizados respectivamente como relleno y como refuerzo. Actualmente, algunas aplicaciones son el cemento, hormigón y en aislamientos para la construcción [17,18,52]

A pesar de las posibles aplicaciones, no recupera completamente la fibra limitando su economía circular completa. Pero sigue siendo una de las técnicas más comunes debido a la simplicidad y bajos requisitos de inversión durante el proceso, lo que facilita su implementación a corto plazo. La **Figura *14*** presenta un esquema simplificado del proceso, que abarca desde el desmontaje de las palas, pasando por el corte, tanto in situ como en planta, hasta su transformación en nuevos productos, como la reutilización directa en mobiliario urbano o como material de relleno para refuerzo.

El reciclaje mecánico es uno de los pocos procesos que permite recuperar una parte significativa de los materiales. En cuanto al consumo energético, en bibliografía [18] se reporta un valor de 0,27 MJ/kg para una tasa de alimentación de 150 kg/h. No obstante, otros estudios [52] dan un consumo considerablemente mayor, de 25,57 MJ/kg. Dado que este último estudio es notablemente más antiguo, es posible que no contemple las mejoras tecnológicas y de eficiencia implementadas en los últimos

años. Por este motivo, se ha optado por tomar como referencia el valor de 0,27 MJ/kg para el análisis de este trabajo.

Figura 14. Procesos de reciclaje mecánico de aerogeneradores al final de su vida útil [17].

5.2.4. Reciclaje térmico

En los procesos de reciclaje térmico, se emplea calor para descomponer los compuestos. Las altas temperaturas, entre 450 y 700 °C [21,42,58], las cuales dependen de la resina empleada, provocan que los materiales volátiles insignificantes se quemen, dejando solo las fibras valiosas [43]. El reciclaje térmico se divide en tres, pero en el presente trabajo solo se van a estudiar la pirólisis y el lecho fluidizado, dejando fuera del análisis la combustión-incineración y la pirólisis por microondas como se explica en el apartado 5.2.1.

A diferencia del caso de las CF, el reciclaje térmico reduce la resistencia de la fibra de vidrio siendo difícil reutilizarla debido a sus bajas propiedades mecánicas. Existen tratamientos, aplicados durante el proceso de reciclaje, que mejoran las propiedades mecánicas de las fibras recicladas, como la resistencia a la tracción, ayudando a recuperar parte de las propiedades perdidas [43].

5.2.4.1. Pirólisis

A diferencia de otros procesos, en la pirólisis el calentamiento para la recuperación de los compuestos se lleva a cabo en condiciones de ausencia de oxígeno. El material se calienta de manera gradual, lo que provoca que la resina se descomponga en varias etapas, liberando gases y dejando un residuo sólido conocido como carbón o “char”. Por su parte, las fibras de vidrio no se queman ni se descomponen, sino que permanecen intactas como un esqueleto dentro del material, por ser inorgánicas y térmicamente estables. [24,43,59,60].

El esquema del sistema de pirólisis se presenta en la *Figura 15.* El proceso comienza con la alimentación de los residuos de las palas, que son introducidos en el reactor de pirólisis con elevadas temperaturas y ausencia de oxígeno. En este reactor, la matriz polimérica sufre una descomposición térmica que da lugar a tres corrientes principales de productos, las fibras de vidrio, los rellenos inorgánicos y el carbón residual. Las fibras recuperadas se limpian mediante una combustión

secundaria para su reutilización. Paralelamente, se produce un gas de escape caliente, compuesto por una mezcla de hidrocarburos volátiles, que se enfría en un condensador para obtener bio-aceites, siendo valiosas materias primas para nuevos productos o combustibles. Parte de los gases no condensables son recirculados para alimentar térmicamente el proceso, optimizando la energía consumida. Los gases restantes se envían a combustión secundaria, que además de limpiar las fibras, recupera energía útil para la planta [24,43,59,60].

La pirólisis es un proceso eficaz que permite la recuperación de fibras largas y limpias, además de, recuperar en gran medida el módulo elástico y la resistencia la tracción. Sin embargo, es de los procesos que más demanda energética con lleva, alrededor de un 21,2 MJ/kg [18,21,44,52].

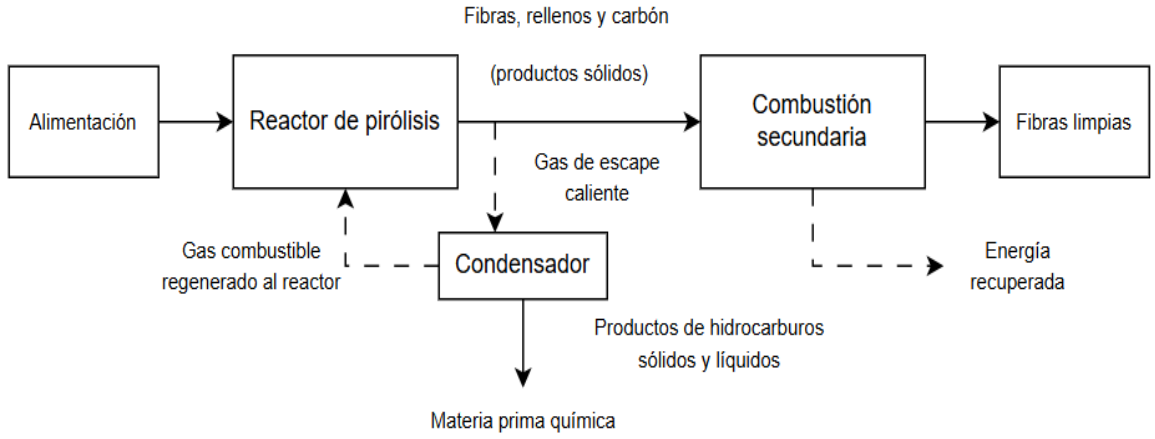

Figura 15. Proceso de pirólisis empleado en el reciclaje de las palas de aerogenerador [43].

5.2.4.2. Lecho fluidizado

El lecho fluidizado también es un método de reciclaje térmico. El sistema se basa en un lecho de arena de sílice calentado, el cual actúa como medio de transferencia térmica. El proceso, ilustrado en la *Figura 16*, comienza con la inyección de aire precalentado desde la parte inferior del reactor. Este aire atraviesa el lecho de arena, generando el movimiento de la misma, favoreciendo una distribución uniforme de la temperatura. Una vez estabilizada la temperatura del lecho, entre 400 y 600°C [21,42], los residuos se introducen en la parte superior o lateral del reactor. Al entrar en contacto con el lecho caliente, la resina se degrada térmicamente, liberando gases orgánicos volátiles, mientras que las fibras de vidrio permanecen sólidas y pueden ser separadas posteriormente. Los gases generados, junto con partículas finas y posibles fibras arrastradas, ascienden y son conducidos a un sistema de separación que incluye un colector de fibras. Estas fibras pueden ser almacenadas para su posterior uso o reciclaje. El gas resultante del proceso puede pasar por un segundo sistema de filtrado o tratamiento, y luego es expulsado a través de una chimenea o conducido a una cámara de postcombustión si es necesario [31,43,44,58,61].

El proceso presenta limitaciones como la degradación de la resistencia y la longitud de la fibra. Para GF solo se ha logrado un rendimiento de fibra del 67 % [43], con una resistencia a la tracción limitada

[42,44] en comparación de la fibra virgen. Para mejorar el rendimiento se pueden añadir catalizadores. Todo el proceso consume unos 22,2 MJ/kg [18,44,52].

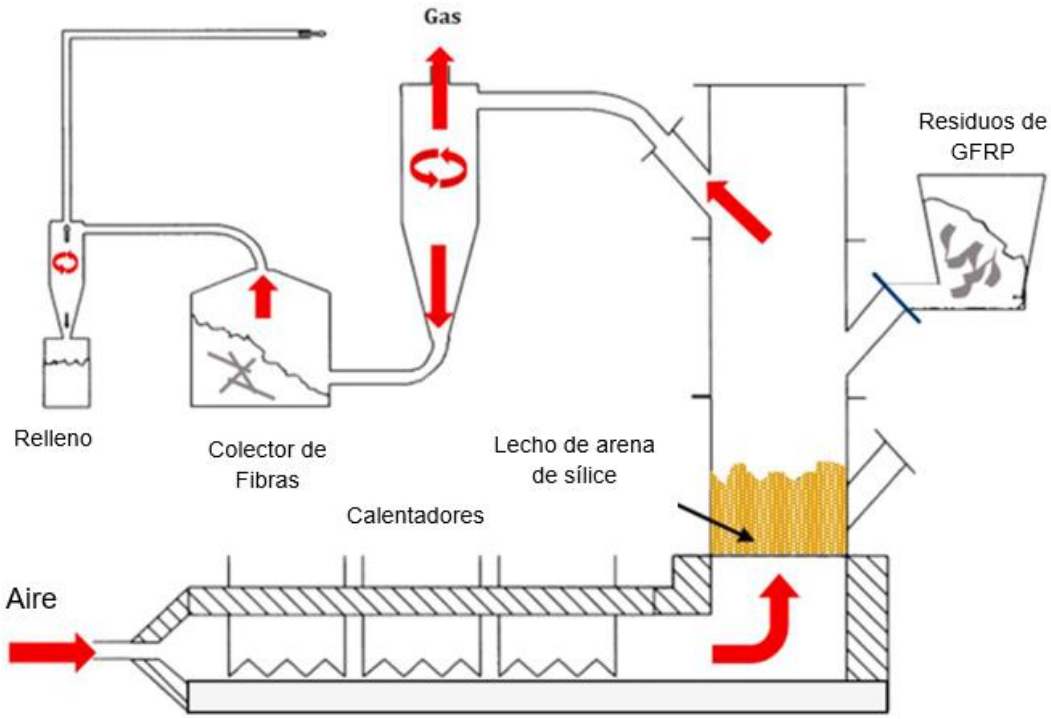

Figura 16. Diagrama de proceso de lecho fluidizado [31,44,58].

5.2.5. Proceso químico

El reciclaje químico consiste en la desintegración de la matriz polimérica en soluciones químicas, como ácidos, bases y disolventes. Normalmente, los productos químicos se eligen en función de la naturaleza del sustrato polimérico y los compuestos solidos se trituran mecánicamente antes del reciclaje para aumentar el área superficial. Tras la disolución de la matriz polimérica, las fibras recicladas se lavan para eliminar residuos superficiales menores. Dichas fibras conservan buenas propiedades mecánicas. A pesar de ser una tecnología prometedora, se encuentra en fase de desarrollo y no está implementada a gran escala [17,42].

5.2.5.1. Solvólisis

La solvólisis es un proceso de reciclaje químico orientado a la recuperación de materiales compuestos. El proceso comienza, igual que los otros métodos, con el desmontaje de la turbina eólica fuera de servicio, seguido de cortes mecánicos in situ para la obtención de los restos de materiales compuestos. Estos residuos se introducen en un reactor, donde se combinan con un disolvente y se someten a condiciones específicas de temperatura y presión. Generalmente, se lleva a cabo en condiciones subcríticas o supercríticas del disolvente, lo que permite la despolimerización de las resinas termoestables. En este entorno, el disolvente actúa rompiendo enlaces específicos y eliminando la unión cruzada entre la resina y las fibras, favoreciendo su separación. Ellos permiten recuperar las fibras, productos químicos derivados de la resina y compuestos minerales, obteniendo una degradación eficiente de la matriz polimérica [17,31,62]. La *Figura 17* muestra el esquema del proceso.

Una de las principales ventajas del proceso es su capacidad para conservar gran parte de las propiedades mecánicas originales de las fibras. En el caso de la fibra de vidrio, se estima que la resistencia mecánica recuperada alcanza aproximadamente el 75 % de la fibra virgen [44]. Sin embargo, este método también presenta desafíos importantes al requerir de altas temperaturas y presiones, lo que implica el uso de equipos costosos y un elevado consumo energético. En ausencia de datos específicos para la fibra de vidrio, se asume un consumo energético similar al de la fibra de carbono estimado en 19,2 MJ/kg [18], uno de los más altos entre los métodos de reciclaje analizados [31].

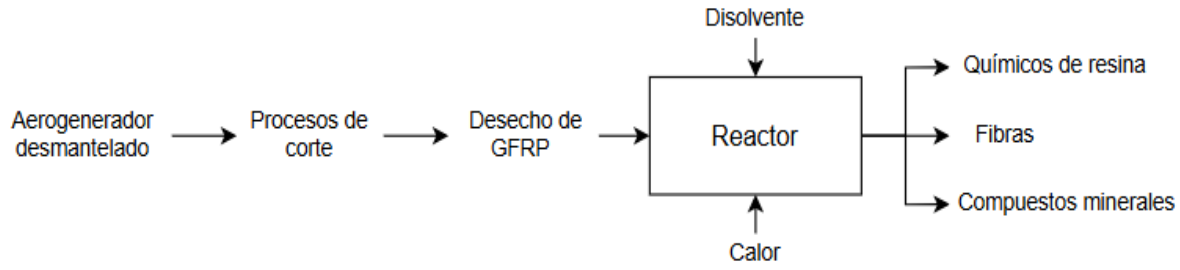

Figura 17. Diagrama de proceso de solvólisis para el reciclaje de palas de aerogeneradores [62].

5.3. Análisis comparativo de los métodos de reciclaje de palas

5.3.1. Condiciones generales

La gestión de las palas de aerogenerador una vez que llegan al final de su vida útil es un proceso complejo que requiere de planificación y coordinación. La *Figura 18* muestra el esquema general del tratamiento de las palas una vez llegan al final de su uso. Todo comienza con el desmontaje de las palas que forman parte del proceso de extracción del rotor. Durante el proceso, las palas se desmontan individualmente utilizando grúas especializadas para manipular de forma segura estas grandes estructuras. Para facilitar el transporte y manejo de las palas una vez desmontadas, estas se cortan en secciones más pequeñas. Este corte es necesario debido a las dimensiones y características de las palas, y permite su traslado hacia instalaciones de eliminación o reciclaje con mayor facilidad. Esta fase es imprescindible al no solo cortar sino también separar los distintos materiales que componen la pala, aunque es un proceso complejo debido a la naturaleza de los materiales compuestos con los que están fabricadas. Tras el corte y la separación, los fragmentos se trituran para reducir su volumen, lo que no solo hace más eficiente el transporte, sino que también optimiza las siguientes etapas del proceso. Una vez preparados, estos materiales se trasladan a las plantas de procesamiento o, en su defecto, a instalaciones de disposición final. El transporte puede realizarse por carretera, ferrocarril o incluso por mar, dependiendo del volumen, la distancia y las condiciones logísticas. En este estudio se considera la opción por carretera, al estar situada la supuesta planta en una zona accesible con camión. Las estimaciones de la bibliografía [69] indican el empleo de un camión de grandes dimensiones. Este vehículo cuenta con una capacidad máxima de carga de 22.000 kg. Aunque por su capacidad el camión podría transportar hasta dos palas completas y parte de una tercera en cada viaje, para efectos del estudio se ha considerado que en cada trayecto se transporta únicamente una pala.

Ya en las instalaciones de reciclaje, los materiales siguen distintas rutas en función de la tecnología disponible. Una vez finalizado el proceso de reciclaje, pueden generarse residuos que deban ser enviados a vertedero, como es el caso de las cenizas. Por otro lado, se obtiene el material reciclado, el cual debe ser almacenado adecuadamente y gestionado posteriormente para su traslado a las fábricas donde vaya a ser empleado.

Independientemente de la ruta de gestión elegida para los residuos, la mayoría de los métodos requieren algún tipo de pretratamiento. Este proceso es una etapa esencial que se realiza una vez que las palas se encuentran en la planta de tratamiento y su objetivo es adaptar el residuo a las condiciones requeridas por el tratamiento. Entre las actividades más comunes se encuentran el triturado, para reducir aún más el tamaño del material y facilitar su manipulación, y la homogeneización, que busca obtener una mezcla más uniforme, especialmente relevante en procesos térmicos o químicos. En algunos casos, como en la pirólisis o la solvólisis, pueden requerirse etapas adicionales como la separación de componentes no deseados, el secado o la mezcla con agentes específicos. Estas acciones, suponen un consumo energético adicional, 0,144 MJ/kg, así como posibles pérdidas de material, entorno a un 2 % [29,49].

El proceso de fabricación de una sola pala, junto con el consumo energético asociado al transporte, operación y mantenimiento, se estima en un total aproximado de 875,4 GJ [18].

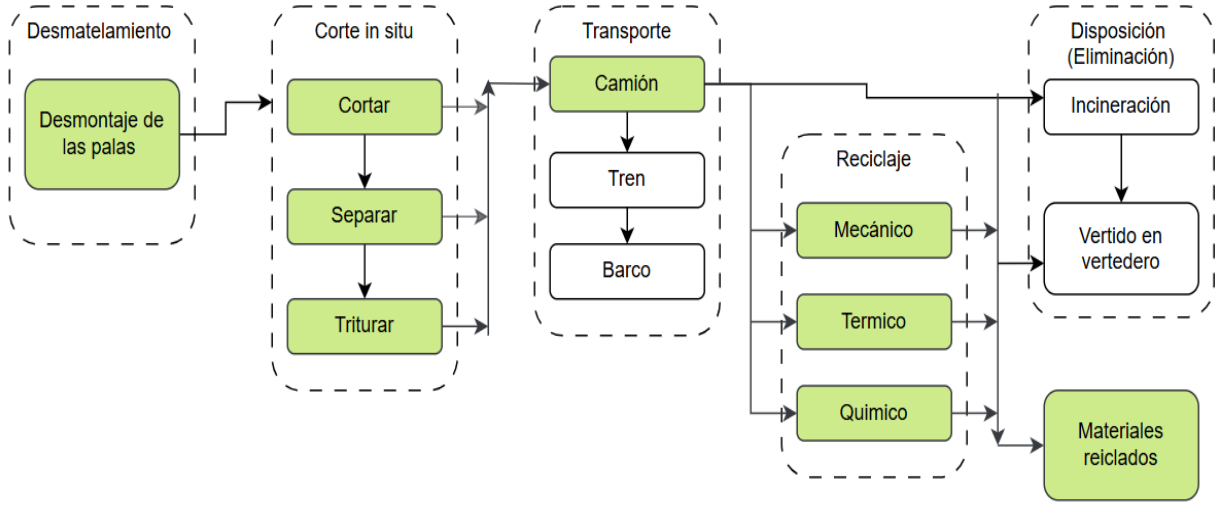

Figura 18. Procesos considerados en la evaluación del ciclo de vida de las estrategias para el final de vida de las palas de aerogenerador [36].

5.3.2. Descripción de la pala a estudio

En el presente estudio se ha realizado un análisis comparativo de las principales rutas disponibles para el reciclaje de palas de aerogenerador al final del ciclo de vida, basado fundamentalmente en dos artículos que analizan dos modelos distintos de palas de fibra de vidrio (GF). Por un lado, se ha considerado la pala modelo 45.2A de la marca Sinomatech, con una longitud de 45,2 metros, una potencia nominal de 1,5 MW y una masa total de 7.580 kg [18].

Por otro lado, se ha tomado como referencia una pala de 48,7 metros de longitud asociada a una turbina eólica de 1,7 MW, con una masa total de 9.000 kg. La composición material incluye 5.283 kg de fibra de vidrio, 2.401 kg de resina termoestable epoxi, así como otros componentes como madera balsa, adhesivos, acero y gelcoat [36]. Ambas palas permiten completar el análisis, enriqueciendo así la comparativa de las tecnologías de reciclaje.

Cuando sea necesario emplear datos en los cálculos, se asumirá una masa promedio de 8.124 kg, la cual presenta una pérdida del 2%, y una longitud de 47 metros, con el fin de obtener un balance entre ambas palas analizadas. La *Figura 19* representa una pala de aerogenerador que, aunque no es una pala específica, se ha incluido como soporte para visualizar el objeto en análisis.

Figura 19. Imagen de referencia de una pala de aerogenerador [63].

5.3.3. Ubicación de la planta de reciclado

La implantación de una planta de reciclaje de palas se plantea únicamente como una hipótesis de trabajo y no forma parte del objetivo principal del estudio. Su finalidad es establecer un contexto realista que permita obtener estimaciones aproximadas de distancias, costes logísticos y eficiencia en las distintas rutas de reciclaje. Esta idea actúa como soporte para el análisis comparativo, sin implicar en ningún caso un estudio de viabilidad ni una propuesta concreta de implantación.

Galicia es la segunda comunidad autónoma donde se encuentran ubicados más parques eólicos, de los cuales gran parte deben ser repotenciados. Además, cuenta con una tradición industrial, presencia de puerto y un apoyo institucional como el Plan Gallego de Energía y Clima. En la provincia de A Coruña, existen 25 parques eólicos autorizados que se encuentran íntegramente en su territorio, además de al menos un parque compartido con Pontevedra. Empresas como Naturgy, Endesa o Iberdrola lideran proyectos de repotenciación en Galicia, incluyendo parques como Monte Redondo,

Novo, Castelo o Coriscada, comentado en el apartado 2, donde se sustituirán decenas de turbinas antiguas por un número reducido de nuevas máquinas más potentes [5,56,64].

Tras la evaluación de la situación territorial e industrial en Galicia, se observó que la provincia de A Coruña podría ser la opción más adecuada para implantar una planta de reciclaje de palas, tanto por volumen de residuos disponibles como por infraestructura y apoyo institucional. En la actualidad, no cuenta con ningún centro de reciclaje de palas, pero la zona del polígono industrial de As Pontes o Ferrolterra se presentan como opciones estratégicas.

En primer lugar, As Pontes cuenta con una larga tradición industrial, especialmente ligada a la producción energética. Durante décadas, su economía giró en torno a una de las centrales térmicas más importantes de España, operada por Endesa. La progresiva descarbonización de su economía ha dejado infraestructuras disponibles y perfectamente acondicionadas, redes logísticas consolidadas y una mano de obra cualificada, lo que reduce los costes de implantación y facilita la transición hacia una economía circular [56]. Otro punto para destacar es la conectividad del municipio. Las principales vías de transporte terrestre permiten la entrada y salida de materiales con gran eficiencia, mientras que la cercanía con el Puerto Exterior de Ferrol amplía las posibilidades logísticas y abre la puerta a relaciones comerciales de mayor alcance, tanto dentro del país como a nivel internacional. Esta combinación de acceso terrestre y marítimo refuerza la viabilidad de implantar una planta de reciclaje capaz de recibir residuos de diferentes orígenes y distribuir productos valorizados de forma ágil.

Por su parte, el parque industrial de Ferrolterra también presenta ventajas significativas. Esta área dispone de suelo industrial bien equipado, acceso portuario internacional y una ubicación geográfica que facilita la recogida de residuos desde distintas comarcas del norte de Galicia. La presencia de sectores industriales diversos en la zona puede fomentar sinergias entre empresas, favoreciendo al reciclaje y la sostenibilidad [64].

En ambos casos, la existencia de espacios industriales, junto con el apoyo de las administraciones locales para revitalizar estas zonas, refuerzan su idoneidad para acoger proyectos de economía circular como una planta de reciclaje.

Por otro lado, aunque no se dispone de datos específicos sobre los costes de construcción de una planta de reciclaje de palas eólicas en Galicia, se pueden estimar siguiendo proyectos similares en España. Por ejemplo, una planta propuesta en el polígono del Bayo (León), que tenía como objetivo reciclar 2.000 toneladas anuales de palas eólicas y 5.000 de residuos de fibra de vidrio, generando 30 empleos directos [65,66].

La *Figura 20* muestra la ubicación real de los polígonos industriales seleccionados dentro de la comunidad autónoma, propuestos como puntos de tratamiento para el reciclaje. A partir de los parques eólicos gallegos en proceso de repotenciación, mencionados en la Introducción, se ha estimado una distancia media de unos 60 km desde los polígonos hasta dichos parques. Esta estimación permite tener una referencia para calcular los costes logísticos asociados al transporte, los cuales se

desarrollan más adelante en el apartado 5.3.6. Además, permite hacerse una idea más clara de la relación territorial entre las zonas de generación del residuo y los posibles centros de tratamiento.

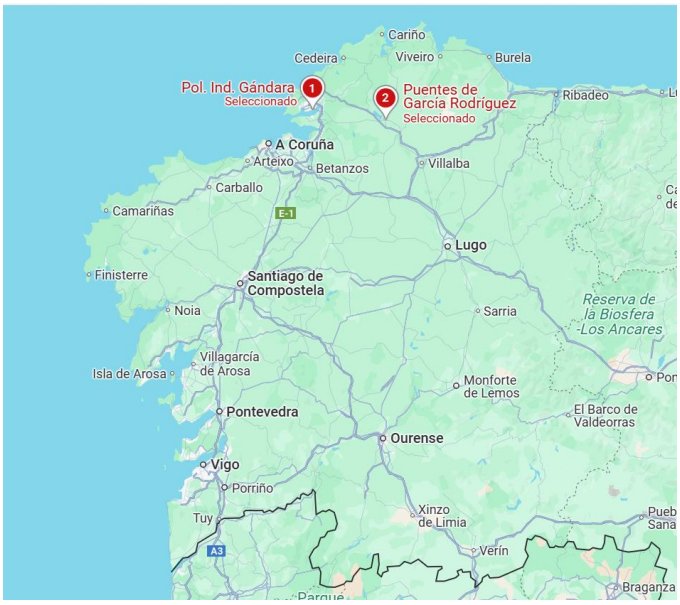

Figura 20. Ubicación aérea de las supuestas plantas de reciclado.

5.3.4. Recuperación de materiales

La eficiencia del proceso y la calidad de los materiales recuperados son principales aspectos para considerar debido a que ambos factores determinan el potencial de sostenibilidad y su contribución a la economía circular. El material reciclado puede clasificarse en cinco categorías, en función del tipo de transformación que sufren durante el proceso. La primera es el porcentaje de material que deposita en vertedero o que se pierde durante el tratamiento como el polvo generado durante el corte de la pala. La segunda categoría, hace referencia a la fracción de material incinerado durante el proceso y generalmente, se emplea como energía térmica para el propio proceso. La tercera son los productos de petróleo y gas generado durante los procesos térmicos. Por último, la cuarta y quinta categoría hacen referencia a los materiales solidos reciclados. Los principales materiales solidos reciclados son aquellos de alto valor, como mezclas ricas en fibras. Los materiales secundarios son los residuos de menor valor que no conservan propiedades útiles para aplicación estructurales, como polvo rico en resina o cenizas [18,36]. La *Figura 21* presenta la distribución de los materiales para cada uno de los enfoques de fin de vida. Puede observarse cómo el reciclaje mecánico realiza la mayor recuperación de material solido reciclado, representando alrededor del 95 % de la masa de la pala. Se obtienen productos ricos en fibra, primario, o ricos en resina, secundario, que se destinan respectivamente, a convertirse en refuerzo o en relleno [44]. El material reciclado primario se encuentra entre el 35 y el 40 % de la masa, siendo una mezcla rica en fibras. Mientras tanto, el secundario representa alrededor de un 55 y un 60 % de una mezcla de polvo rico en resina. La alta tasa de recuperación de materiales solidos permite su reincorporación en el ciclo productivo, fomentando la economía circular. La incineración toma gran importancia en los métodos de solvólisis y lecho fluidizado, al representar más del 30 % de la masa de la pala. Se produce la pérdida significativa de material y se limita la economía

circular. Sin embargo, siguen destacando por su capacidad de recuperación de residuos en forma de solidos primarios, produciendo una tasa entre el 50 y 55 %.

Cabe mencionar el porcentaje de subproductos de petróleo y gas que se generan durante la pirólisis. Como se explica en el apartado 5.2.4.1, durante este proceso la resina se descompone en distintos compuestos incluyendo gases no condensables, como monóxido y dióxido de carbono, metano, y líquidos condensables, como fenoles y alifáticos. No obstante, estos productos son similares a los derivados del petróleo y pueden emplearse como fuentes de energía durante el reciclado [29,42].

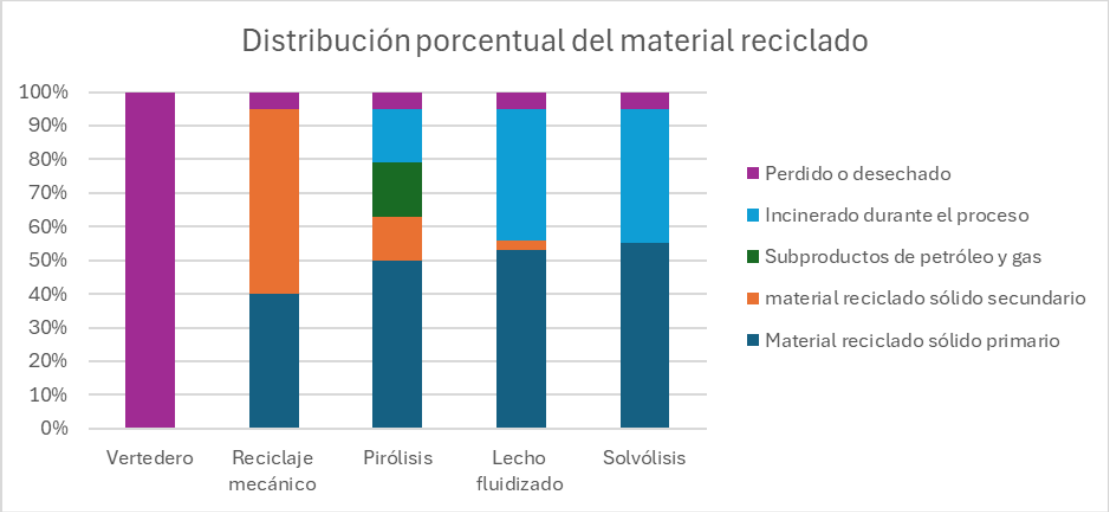

Figura 21. Distribución porcentual de material reciclado en diferentes categorías [18,36].

Una vez analizados los materiales reciclados obtenidos, se profundiza en el estudio de las propiedades mecánicas y físicas de la GF reciclada. La resistencia a la tracción y la longitud de fibras son las características más afectadas debido a que la mayoría de los procesos se basan en la degradación de la matriz. Además, durante los procesos de reciclaje se pueden introducir impurezas o contaminación orgánica.

Por otro lado, en la *Tabla 2* se han resumido las propiedades mecánicas del material reciclado, de los diferentes métodos, excluyendo el vertedero, ya que no se recupera material. La pirólisis destaca por obtener la mayor longitud de fibra, las cuales permiten una mayor transmisión de cargas al tener una mayor superficie de contacto con la matriz, además de mejorar la resistencia a la tracción y la orientación estructural. Todo ello permite mantener el módulo elástico intacto, es decir, la rigidez se conserva, y generar una reducción menor del 50 % en la resistencia a la tracción en comparación con la fibra de vidrio virgen (vGF). La pirólisis y el lecho fluidizado son menos propensos a la contaminación debido a los procesos de oxidación y limpieza que se realizan durante el proceso de reciclaje. La solvólisis, podría considerarse uno de los mejores métodos, pero no se han encontrado datos suficientes para poder demostrarlo. Por último, el reciclaje mecánico se ve limitado por la longitud de las fibras obtenidas. Este proceso de reciclaje consiste en la trituración física, con molinos o trituradoras, de las fibras de vidrio, reduciendo su tamaño original. Además, a pesar de presentar buenas propiedades mecánicas en comparación a los otros métodos, las partículas del material

reciclado no se adhieren bien al polímero nuevo en un compuesto [58]. Se genera una unión débil entre ambos provocando que el material no distribuya bien las cargas aplicadas. Esto reduce la resistencia, porque las partículas pueden soltarse o generar puntos débiles, y también disminuye la tenacidad, ya que el material se vuelve más frágil y absorbe menos energía antes de romperse.

Tabla 2. Resumen de las características del material reciclado [18,21,42,44,58].

Parámetros	R. Mecánico	Pirólisis	Lecho fluidizado	Solvólisis
Resistencia a la tracción (%)	70	52	50	75
Módulo de elasticidad (%)	90	100	100	—
Longitud [mm]	0,1–6	10–15	5–10	—

5.3.5. Consumo energético

Uno de los aspectos fundamentales que se deben considerar al analizar la viabilidad y sostenibilidad de los distintos métodos de reciclaje es el consumo energético asociado a cada uno de ellos. Aunque factores como la cantidad de material recuperado o la calidad final de dicho material son relevantes en términos de eficiencia del proceso, no pueden evaluarse de forma aislada. El coste energético necesario para llevar a cabo cada técnica de reciclaje tiene un peso considerable tanto en su impacto ambiental como en su rentabilidad económica, convirtiéndose así en un criterio decisivo para su implantación a gran escala.

En este sentido, el concepto de energía específica cobra una especial importancia. Este parámetro hace referencia a la cantidad de energía que se requiere para procesar cada kilogramo de material. Cuando el valor de energía específica es bajo, se entiende que el proceso es más eficiente desde el punto de vista energético, lo que implica que se necesita menos consumo de recursos para lograr resultados similares. Esta mayor eficiencia no solo conlleva una reducción en los costes operativos, sino que también favorece una menor huella ambiental, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía circular.

La *Tabla 3* presenta tanto el consumo del proceso de reciclaje como el consumo estimado total del ciclo de vida de las palas. El vertedero y el reciclaje mecánico cuentan con la menor energía específica, aunque a cambio de sacrificar por completo el material reciclable en el primer caso, o de obtenerlo con una calidad muy inferior en el segundo.

En términos generales, los procesos térmicos presentan los resultados menos favorables, ya que son los que mayor demanda energética requieren, registrando los valores más altos tanto en energía específica como en consumo energético total. Dichos valores reflejan una menor eficiencia energética en comparación con otras alternativas, lo que supone no solo un mayor impacto ambiental, sino también unos costes operativos considerablemente más elevados. En el caso de la pirólisis, esto se ve parcialmente compensado por el crédito energético derivado de la recuperación de materiales, aunque sigue siendo una de las alternativas más intensivas energéticamente en el cómputo global.

Por otro lado, la solvólisis, a pesar de su elevada demanda energética asociada al uso de calor, presión y disolventes, consigue el menor impacto total del ciclo de vida, gracias a su elevado crédito energético.

Tal como se expuso en el apartado de 5.3.4, aunque no se dispone de datos experimentales concretos, la literatura especializada indica que las propiedades de los materiales recuperados mediante este proceso tan solo muestran una ligera perdida. No obstante, siguen siendo adecuadas para su reutilización en múltiples aplicaciones. Además, en determinados casos, los disolventes empleados permiten recuperar oligómeros o monómeros que pueden ser usados como materia prima en la síntesis de nuevas resinas. Todo ello posiciona a la solvólisis como una de las alternativas con menor consumo energético neto, lo que se traduce en un impacto ambiental y económico notablemente reducido.

Tabla 3. Datos del consumo energético de los diferentes métodos de reciclaje [18,44,52].

Parámetros	Vertedero	R. Mecánico	Pirólisis	Lecho Fluidizado	Solvólisis
Energía Especifica (MJ/kg)	0,26	0,27	21,20	22,20	19,20
Consumo del porceso de reiclaje (GJ)	2,11	2,44	172,22	180,34	155,97
Credito (GJ)	0,00	-92,18	-73,79	-44,60	-265,82
Consumo total del ciclo de vida (GJ)	877,50	878,92	1048,70	1056,82	1032,45

5.3.6. Emisiones asociadas

El consumo de energía es un factor clave en la evaluación de los métodos de reciclaje, ya que está directamente relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se emiten durante el proceso. Este aspecto es especialmente importante porque dichas emisiones contribuyen significativamente al cambio climático, por lo que producir las menos posibles se ha convierte en una prioridad en cualquier estrategia ambientalmente responsable. En este análisis, se han considerado no solo las emisiones generadas directamente durante el tratamiento de las palas, sino también las derivadas de otras etapas del proceso, como el transporte, su desmantelamiento o la reducción de su tamaño in situ. Todos estos factores se reflejan en valores positivos en la *Figura 22*. Por otro lado, los valores negativos indican el crédito de emisiones, es decir, las emisiones no generadas gracias al uso de material reciclado en lugar de material virgen. Por ejemplo, si una pala reciclada puede sustituir una parte de la producción de fibra de vidrio nueva, entonces se contabiliza como una reducción de emisiones, ya que se ha evitado el impacto que tendría producir ese material desde cero. La suma de las emisiones positivas y los créditos negativos da como resultado las emisiones totales netas totales, que permite evaluar que alternativa genera el menor impacto ambiental.

Para estimar el impacto ambiental del transporte de las palas, se ha considerado el uso de un camión con motor diésel. Este presenta un consumo medio de 25 litros por cada 100 km cuando transporta carga y de 22 litros por cada 100 km en el trayecto de retorno sin carga. A partir de estos valores, y tomando como referencia un poder calorífico del diésel de 35,8 MJ por litro y un factor de emisión de 2,68 kg de CO_2 por litro de combustible [67], se calcula el consumo energético y las emisiones asociadas al transporte. En total, para el traslado completo, es decir, tanto la ida a la planta como la vuelta al parque eólico, se calcula un consumo de aproximadamente 29 litros de combustible, lo que equivale a 1.010 MJ. Este consumo genera unas emisiones de alrededor de 76 kg de CO_2equivalente por pala transportada.

El reciclaje mecánico resulta ser el método con las emisiones netas más bajas. Esto se debe, en parte, a su simplicidad. Al no obtener la separación de la resina y la fibra, consume menos energía y, por lo

tanto, produce menos emisiones. Este resultado es coherente con lo que se había mencionado anteriormente sobre su bajo consumo energético. Respecto a los otros métodos, aunque algunos muestran créditos importantes por la sustitución de materiales vírgenes, en muchos casos estos no son suficientes para compensar todas las emisiones generadas durante el proceso. Un ejemplo claro es el vertido en vertedero, que es la opción convencional de eliminación y no aporta ningún crédito, ya que no se recuperan materiales. Por ello, esta alternativa representa el mayor impacto ambiental de todas. Por su parte, los métodos térmicos, a pesar de que permiten recuperar parte del contenido energético o de los materiales, todavía mantienen una carga ambiental considerable. El método químico, aunque ofrece un crédito notable por la recuperación de materiales, tiene las emisiones netas más elevadas debido al alto consumo energético necesario para alcanzar las altas temperaturas y presiones que requiere el proceso.

Si bien, cuatro de las tecnologías de reciclaje obtienen emisiones netas positivas, estos valores son considerablemente inferiores a los que se generarían en la fabricación de una pala de turbina nueva, estimados entre 45.000 y 50.000 kg de CO_2 equivalente [36]. Esto indica que el reciclaje sigue tenido un impacto, pero es una opción mucho más favorable en términos ambientales que la producción desde cero, lo que refuerza su importancia.

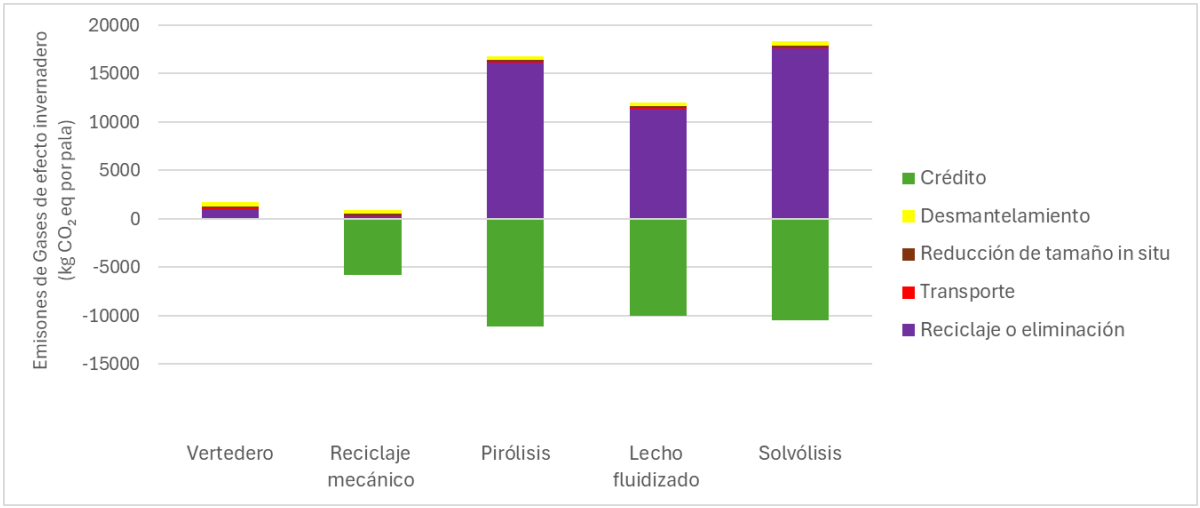

Figura 22. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por Pala ($kg\ CO_2 eq$ por pala) [36].

5.3.7. Análisis económico

El desmantelamiento de aerogeneradores implica una serie de costes asociados a la eliminación de sus componentes y la disposición o reciclaje de materiales. Aunque la literatura sobre los costes específicos del reciclaje de palas es limitada, algunos informes proporcionan estimaciones aproximadas. En concreto, indican que el coste total de desmantelar un aerogenerador completo es de 117.894 € [68] de los cuales se estima que el 30 % corresponde a las palas, lo que da un coste aproximado de 35.369 € por unidad. El tiempo estimado para las actividades de desmontaje suele ser de un día y media a dos por turbina. Este valor del proceso de desmontaje incluye no solo la mano de obra, sino también el uso de maquinaria y herramientas específicas, así como la carga de las palas en vehículos de transporte para su retirada del sitio. Además, contempla todos los gastos asociados a la

gestión integral del proyecto, incluyendo la obtención de permisos, el cumplimiento de normativas y regulaciones vigentes, así como la contratación de seguros necesarios y la administración general del proceso de desmantelamiento.

Con el fin de facilitar tanto el transporte como el manejo de las palas una vez desmontadas, estas son seccionadas en partes más pequeñas mediante procesos de corte *in situ*. Esta etapa es crucial en el proceso de desmantelamiento, ya que las dimensiones de las palas, en este caso 47 metros de longitud, hacen inviable su traslado como piezas enteras debido a las limitaciones logísticas. Al reducir su tamaño, no solo se facilita el transporte, sino que también se aprovecha para separar los distintos materiales que las componen, como el acero, con el objetivo de darles una segunda vida útil o eliminarlos adecuadamente. Sin embargo, esta tarea no es sencilla, ya que las palas están hechas de materiales compuestos muy resistentes, diseñados precisamente para soportar condiciones extremas. Tras el corte, los fragmentos resultantes se trituran para disminuir aún más su volumen, lo que permite un transporte más eficiente y simplifica las etapas siguientes del proceso, ya sea para reciclar, reutilizar o desechar correctamente los materiales. Esta etapa añade una capa adicional de complejidad y coste al proceso, ya incluido en el coste aproximado presentado. Se estima que el coste total por pala asciende a 432,8 €, sin considerar el alquiler o la compra de la maquinaria utilizada.

Para el cálculo del coste asociado al transporte de los residuos ya cortados desde el parque eólico hasta la planta de reciclaje, se estima el empleo de un camión de grandes dimensiones, explicado en el apartado 5.3.1. Este vehículo cuenta con una capacidad máxima de carga de 22.000 kg, en el cual el coste medio de operación se estima en 2,30 € por kilómetro recorrido, según bibliografía [69]. Teniendo en cuenta la distancia estimada entre la ubicación de los parques eólicos y la planta de reciclaje, según lo expuesto en el apartado 5.3.3, se ha calculado un coste total de transporte de 276 € por trayecto. Este valor se considera constante e independiente del método de reciclaje aplicado, ya que el volumen y peso del material transportado no varían en función de la técnica empleada. Un aspecto a tener en cuenta durante el proceso de corte in situ de las palas, es que inevitablemente se genera una pérdida de material, generalmente en forma de polvo y pequeñas partículas. Sin embargo, no se tiene en cuenta en los cálculos, ya que la masa y el volumen perdidos son relativamente bajos en comparación con las secciones principales trasladadas.

Con el propósito de estimar de manera realista los costes asociados a la mano de obra implicada en el proyecto, se ha optado por utilizar una media del salario bruto anual de los trabajadores. Se ha estimado que el salario bruto medio anual de un operario en este sector es de 43.000 euros. Se han calculado un total de 1.920 horas trabajadas al año, lo que equivale a una jornada completa de 40 horas semanales distribuidas a lo largo de 48 semanas, sin contar el tiempo correspondiente a vacaciones y días festivos. A partir de estos datos, se obtiene un coste medio por hora trabajada de aproximadamente 23 euros [69].

El análisis de los costes asociados al reciclaje de palas de aerogenerador revela importantes diferencias entre los procesos disponibles, presentando costes y beneficios muy dispares. Para ello se

han empleado la literatura de [44,45,52,68,69]. En general, los costes operativos de las diferentes tecnologías de reciclaje varían principalmente debido a los diferentes requerimientos de mano de obra, electricidad, mantenimiento y amortización de la maquinaria. Se ha estimado los costes de producción en la *Tabla 4*. El beneficio se muestra en negativo, debido a que muestra aquella inversión recuperada de la venta de productos primarios y secundarios, la recuperación de energía, y la reducción de residuos enviados a vertedero.

El reciclaje mecánico destaca por ser una de las alternativas más eficientes desde el punto de vista económico. Este tratamiento requiere una infraestructura sencilla y un consumo energético considerablemente inferior que los otros métodos de reciclaje. Dicha eficiencia energética, combinada con la simplicidad del proceso técnico y una demanda de mantenimiento baja, contribuye a reducir los costes operativos generales. Aunque su principal limitación es que no permite recuperar las fibras en condiciones óptimas, representa una solución rentable desde el punto de vista operativo, al tener el menor coste asociado y poder obtenerse beneficios de la venta de la fibra como relleno. Estas características lo convierten en una opción viable para el reciclaje a gran escala, especialmente cuando el objetivo principal es tener el menor coste y no centrarse en la calidad.

En contraste, los métodos térmicos como el lecho fluidizado y la pirólisis presentan costes operativos significativamente más elevados. Esta diferencia se debe, principalmente, al elevado consumo energético que requieren, así como el empleo de equipos especializados y a la frecuencia y complejidad del mantenimiento necesario para su funcionamiento continuo. Estos factores hacen que, desde una perspectiva económica, estas tecnologías sean menos accesibles A pesar de estas desventajas económicas, es importante destacar que ofrecen ventajas significativas en términos de recuperación de materiales. Tanto el lecho fluidizado como la pirólisis permiten extraer materiales valiosos y de calidad conservando sus propiedades similares a las originales. Esto podría justificar su aplicación en determinados contextos donde la valorización de recursos tenga un peso estratégico. No se han encontrado información económica específica sobre los costes del proceso de lecho fluidizado, por lo que se han asumido costes similares a los del proceso de pirólisis, para poder realizar la comparativa.

Por último, la solvólisis destaca en términos económicos, obteniendo un beneficio mayor que el del reciclaje mecánico. Este proceso, aunque es más complejo y está todavía en fase de desarrollo, se estima que permite recuperar fibras con propiedades cercanas a las originales, lo que aumenta su valor de mercado y su utilidad en nuevas aplicaciones industriales. A parte de las fibras recuperadas si se consigue el reciclaje y la reutilización del disolvente incrementa la viabilidad del proceso [62]. No obstante, requiere condiciones técnicas avanzadas y una infraestructura adecuada, lo que limita su implantación inmediata.

Tabla 4. Estimación de los costes del reciclaje de palas [44,45,52,68,69].

Parámetros	R. Mecánico	Pirólisis	Lecho Fluidizado	Solvólisis
Coste de maquinaria (€/pala)	93,00	100,00	100,00	135,00
Hora por Proceso	1,00	0,50	0,50	18,00
Personal necesario	2,00	3,00	3,00	4,00
Mano de obra (€/pala)	46,00	34,50	34,50	1656,00
Consumo energetico (kWh)	676,96	47838,28	50094,80	43325,23
Coste energia (€ /pala)	76,50	3205,64	3356,85	2903,22
Total (€/pala)	215,50	3340,14	3491,35	4694,22
Beneficio recuperados (%)	-10,49	-7,04	-4,22	-25,75

5.4. Evaluación global del método mecánico

Como conclusión del análisis comparativo entre los distintos métodos de reciclaje de palas de aerogenerador, se puede observar que el reciclaje mecánico destaca como la alternativa más viable actualmente desde una perspectiva técnica, económica y ambiental. A pesar de ciertas limitaciones, como la pérdida de calidad de las fibras, presenta importantes ventajas como el menor impacto ambiental, menor consumo energético, y mayor madurez tecnológica para su implementación a corto plazo. En base a estos resultados obtenidos, a continuación, se realiza un análisis más detallado del reciclaje mecánico de palas, a través de herramientas como la matriz de Leopold, el análisis DAFO, el análisis PESTEL y su contribución a los ODS, con el fin de evaluar su viabilidad y repercusiones de forma integral.

5.4.1. Análisis ambiental – Matriz de Leopold

La matriz de Leopold es una herramienta de evaluación de impacto ambiental, adaptada para estudiar en este caso el reciclaje mecánico. Es un análisis cualitativo sobre los efectos ambientales, el cual se muestra en la *Tabla 5* donde en el eje horizontal se encuentran las actividades del proyecto y, en el eje vertical, los factores ambientales que podrían verse afectados con dichas actividades. Cada cruce se evalúa en términos de magnitud e importancia del impacto. La magnitud se puntúa del -10 al +10, positivo si aporta algún beneficio o negativo si por el contrario produce daños. Si el valor esta entorno al ±1 es una magnitud insignificante o si esta entorno al ±10 es una impacto irreversible y severo. Por otro lado, la importancia se evalúa del 1 al 10, siendo el 1 poca relevancia y el 10 un aspecto critico que afecta a gran escala y/o a largo plazo.

Aplicando la matriz de Leopold al reciclaje mecánico de las palas se obtiene que esta opción es favorable desde la perspectiva de sostenibilidad, sin embargo, se observan ciertos factores ambientales que deben ser vigilados. Uno de ellos es la calidad del aire y la salud humana, principalmente asociado a las fases de corte in situ y trituración. Estas actividades generan una cantidad significativa de polvo y partículas, lo que genera un riesgo tanto para los trabajadores como para las zonas cercanas. Este impacto también se ve reflejado en el apartado de ruido y vibraciones, donde las operaciones mecánicas intensas, como la trituración, generan niveles elevados de presión sonora, provocando el uso obligatorio de protectores auditivos. En contraste, los impactos sobre el agua y el suelo son generalmente bajos, ya que el reciclaje mecánico no implica el uso de productos

químicos ni procesos húmedos, lo cual minimiza el riesgo de vertidos o infiltraciones. También se observa un bajo impacto sobre la fauna, dado que el proceso se desarrolla en zonas industriales alejadas, y del impacto visual y paisajístico.

En base a los resultados obtenidos se puede indicar que el reciclaje mecánico ofrece beneficios importantes en términos de generación de empleo y contribución a la economía circular. La simplicidad del proceso, su bajo consumo energético y la capacidad para recuperar materiales provocan que sea una opción rentable y ambientalmente responsable. Además, al evitar el envío de residuos al vertedero y reducir la demanda de materiales vírgenes, contribuye a una gestión de residuos más sostenible.

Tabla 5. Matriz Leopold del reciclaje mecánico.

Factor ambiental ↓ / Actividad →	Desmontaje	Corte in situ	Transporte	Trituración	Separación	Almacenamiento
Suelo	[-5, 6]	[-4, 5]	[-2, 3]	[-3, 4]	[-2, 2]	[-2, 3]
Aire	[-3, 4]	[-6, 7]	[-4, 4]	[-7, 8]	[-5, 6]	[-2, 3]
Agua	[-1, 2]	[-1, 2]	[-1, 1]	[-2, 2]	[-1, 1]	[-1, 1]
Fauna	[-3, 4]	[-2, 3]	[-2, 3]	[-3, 3]	[-2, 2]	[-1, 1]
Ruido / vibraciones	[-3, 4]	[-6, 7]	[-4, 4]	[-7, 7]	[-4, 4]	[-2, 2]
Salud humana (polvo, fibras)	[-3, 4]	[-7, 8]	[-4, 4]	[-8, 9]	[-5, 6]	[-2, 2]
Impacto paisajístico / visual	[-2, 3]	[-2, 2]	[-2, 2]	[-1, 1]	[-1, 1]	[-3, 4]
Empleo y desarrollo socioeconómico	[+6, 7]	[+5, 6]	[+3, 4]	[+5, 6]	[+4, 5]	[+2, 3]
Contribución a reciclaje /	[+5, 6]	[+6, 7]	[+3, 4]	[+7, 8]	[+7, 8]	[+4, 5]

5.4.2. Análisis DAFO

El análisis DAFO es una herramienta que permite estudiar los aspectos internos, fortalezas y debilidades, y externos, oportunidades y amenazas, que influyen en una actividad. En este caso, se aplica al reciclaje mecánico con el objetivo de estudiar sus puntos fuertes, así como las limitaciones propias y las relativas a su implantación. Dicho análisis se muestra en la *Figura 23.*

El proceso de reciclaje mecánico de las palas de los aerogeneradores presenta numerosas fortalezas asociadas a su simplicidad y eficacia. Algunas de ellas son la alta tasa de recuperación de materiales sólidos, que puede alcanzar hasta un 95 % y bajo consumo energético provocando un bajo impacto ambiental y económico. Además, os costes operativos y de mantenimiento son generalmente bajos, al no requerir de procesos térmicos ni químicos. Asimismo, el reciclaje mecánico contribuye de forma positiva a la creación de empleo, especialmente en actividades como el desmontaje, la trituración y la clasificación de materiales.

No obstante, como todo proceso presenta debilidades. La simplicidad del proceso implica que la fibra recuperada tiene una calidad limitada, ya que suele estar fragmentada y posee propiedades mecánicas inferiores en comparación con la fibra virgen. Además, no existe la separación entre la resina y las fibras, siendo menos versátil el producto recuperado. El proceso también genera grandes cantidades de polvo provocando una gestión posterior del mismo e impactos negativos en cuanto a la salud de los operarios.

En cuanto a las oportunidades, es un método establecido tecnológicamente, con un TRL de 8, lo que favorece su implantación a corto plazo. u desarrollo se ve respaldado por normativas europeas que promueven la economía circular y la reducción del vertido en vertederos. La creciente presión social y ambiental refuerza la necesidad de soluciones sostenibles para el tratamiento de residuos, lo que incrementa el interés en este tipo de procesos. Además, dicha inversión en el desarrollo contribuye a la mejora del proceso derivando en condiciones más optimas del material recuperado y sus aplicaciones industriales.

Por último, es necesario considerar las amenazas. En la actualidad existen tecnologías como la solvólisis que presenta mejores condiciones mecánicas de la fibra recuperada a pesar de ser una tecnología emergente. Asimismo, la heterogeneidad en tamaño, diseño y composición de las palas dificulta la estandarización del proceso y afecta a su eficiencia. Finalmente, si no se aplican protocolos adecuados, la exposición al polvo de fibra puede generar problemas laborales y legales.

Figura 23. Análisis DAFO del reciclaje mecánico de las palas de aerogeneradores.

5.4.3. Análisis PESTEL

El análisis PESTEL permite identificar y valorar los factores del entorno que pueden influir directa o indirectamente en la viabilidad y desarrollo de una actividad. En el caso del reciclaje mecánico, presenta una visión de las condiciones políticas, económicas, sociales, tecnológicas, ecológicas y legales que rodean la actividad. La *Figura 24* presenta un resumen esquemático del análisis PESTEL aplicado al reciclaje mecánico.

En el contexto político actual, la Unión Europea (UE) favorece la gestión responsable de los residuos industriales. Las políticas públicas están orientadas a reducir el vertido de materiales compuestos, como las palas de aerogenerador, y promover la economía circular. Además, existen mecanismos de

financiación y apoyo institucional para proyectos de reciclaje sostenible, lo que facilita la implantación de tecnologías como el reciclaje mecánico.

Desde una perspectiva económica, el reciclaje mecánico destaca por su bajo coste operativo y energético, lo que lo convierte en una opción viable y rentable en comparación con otros métodos más complejos. No obstante, los costes asociados al desmontaje, transporte y acondicionamiento de las palas pueden afectar a la eficiencia económica del proceso si no se gestionan adecuadamente. Asimismo, el valor del producto reciclado es limitado en comparación con fibras recuperadas mediante tecnologías más avanzadas, como la solvólisis.

A nivel social, existe una creciente preocupación por la sostenibilidad de las energías renovables, especialmente respecto a la gestión del residuo que generan. El reciclaje mecánico responde a esta demanda, generando además empleo local. No obstante, es necesario garantizar condiciones laborales seguras, ya que la exposición al polvo y fibras durante el proceso puede conllevar riesgos para la salud si no se aplican las medidas de protección adecuadas.

Tecnológicamente, el reciclaje mecánico se apoya en sistemas de trituración, clasificación y almacenamiento ampliamente consolidados. Sin embargo, presenta limitaciones técnicas como la imposibilidad de separar eficazmente la fibra de la matriz polimérica, lo que reduce la calidad del material reciclado. Además, compite con tecnologías emergentes que, aunque más costosas y complejas, ofrecen productos reciclados de mayor valor añadido.

El reciclaje mecánico presenta una baja demanda energética (aproximadamente 0,27 MJ/kg) y escasas emisiones de gases de efecto invernadero, lo que lo posiciona como una de las alternativas más sostenibles desde el punto de vista ambiental. Su elevada tasa de recuperación, cercana al 95 % de la masa total de la pala, representa una contribución significativa a la economía circular. Aun así, es necesario gestionar adecuadamente los residuos secundarios (como polvo y fibras sueltas) para evitar impactos sobre el suelo y la calidad del aire.

Desde el punto de vista legal, el reciclaje mecánico debe cumplir con el marco normativo tanto a nivel europeo como nacional. Como se presenta en el apartado 2.3, la Directiva 2008/98/CE establece la jerarquía de residuos, priorizando el reciclaje sobre la eliminación. El Reglamento (UE) 2020/852 (Taxonomía) exige que las actividades contribuyan a objetivos medioambientales clave, destacando especialmente la transición hacia una economía circular. Además, la Ley 22/2011, sobre residuos y suelos contaminados, impone la responsabilidad a los fabricantes y operadores para garantizar una gestión adecuada al final del ciclo de vida del producto. Normas complementarias, como el Reglamento (UE) 305/2011 y estrategias como la España Circular 2030, refuerzan este marco y promueven el desarrollo de soluciones innovadoras de reciclaje.

Figura 24. Análisis PESTEL del reciclaje mecánico de las palas de aerogeneradores.

5.4.4. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El reciclaje mecánico se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la ONU, al ofrecer una alternativa sostenible al vertedero. A continuación, se detallan los ODS directamente relacionados con esta técnica de reciclaje, ya mencionados en el apartado 2.

En primer lugar, el ODS 9, Industria, innovación e infraestructura, se ve reflejado en el desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos compuestos, impulsando procesos más sostenibles. Además, el ODS 11, Ciudades y comunidades sostenibles, se cumple al facilitar la reutilización de los materiales recuperados, por ejemplo, en mobiliario urbano o elementos de constructivos, reduciendo así la demanda de nuevos materiales.

También destaca el ODS 12, Producción y consumo responsables, ya que esta técnica promueve una gestión más eficiente de los recursos, permitiendo alargar el ciclo de vida de los materiales y reduciendo la extracción de materias primas vírgenes. En relación con el ODS 13, acción por el clima, el reciclaje mecánico contribuye a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), al evitar tanto la producción de materiales nuevos como la acumulación de residuos en vertedero.

Por último, el ODS 15, vida de ecosistemas terrestres, se cumple al evitar impactos negativos sobre el suelo y la biodiversidad, en especial cuando se gestiona correctamente el polvo y los residuos

derivados del proceso. Todo ello refuerza el valor ambiental del reciclaje mecánico y su papel en la transición hacia una economía más circular y baja en carbono.

En conjunto, el reciclaje mecánico no solo responde a una necesidad técnica y medioambiental, sino que también fortalece el compromiso con los principios de sostenibilidad promovidos a nivel global.

5.5. Alternativas de los métodos de reciclaje: extensión de la vida útil

Más allá de los métodos de reciclaje analizados previamente, existen otras estrategias que permiten alargar la vida útil de las palas de aerogenerador. En concreto, la extensión de vida útil se presenta como una alternativa preventiva con el objetivo de proteger las superficies de agentes externos como la radiación ultravioleta, la erosión por lluvia o polvo.

La idea principal se centra en prolongar la vida operativa de las palas, más allá del diseño original. Al retrasar el final de su vida útil, se extiende el periodo de sustitución de palas y se minimiza el envío de residuos a los sistemas de reciclaje. Además, se reduce el uso de nuevos materiales, lo cual es equivalente a menor energía consumida, y menor impacto económico y ambiental.

El proceso estima la vida útil remanente del aerogenerador, para determinar la viabilidad de operar más allá del periodo del diseño original. Para ello, se emplean herramientas analíticas y físicas. Este análisis asegura que, durante el periodo extendido, se mantendrán los niveles de seguridad estructural requeridos [70].

La evaluación analítica realiza una simulación computacional usando modelos aeroelásticos permitiendo calcular el comportamiento de la pala bajo cargas de viento reales. Compara cargas previstas en el diseño original con cargas reales que ha soportado, empelando información ambiental y operativa, como la distribución del viento o la densidad del aire. En paralelo, se realizan revisiones del estado físico de las palas, en búsqueda de grietas, erosiones y cualquier desgaste visual, mediante drones ultrasonido y termografía, además de sistemas como SCADA. Asimismo, se recopilan datos del mantenimiento para comprobar si se realizaron reparaciones de daños previos. En conjunto, los resultados de estas herramientas técnicas permiten la toma de decisiones [70].

Una vez terminado el análisis, se hace un estudio de las reparaciones o refuerzo locales necesarios. Estos pueden ser: la aplicación de recubrimiento de fibra como protección contra la erosión, la reparación de grietas o zonas dañadas con materiales compuestos y/o reforzar con capas adicionales de fibra si hay zonas debilitadas. Si tras todo el análisis se confirma que las palas pueden seguir operando de forma segura, se autoriza la extensión de vida útil entre 5 y 10 años. Se requiere repetir las inspecciones cada cierto tiempo para asegurar que la pala sigue en buen estado [70].

Actualmente, tanto los fabricantes como los proveedores de servicios de operación y mantenimiento están recurriendo a esta estrategia, considerándola una opción viable. Sin embargo, cuando el producto se acerca al final de su vida, comienzan a surgir problemas estructurales [18,71].

En el caso de palas de 2 MW, el coste estimado para una extensión de vida de 5 años es de 0,172 €/kg, lo que representa aproximadamente 2.388 € por pala. La rentabilidad de esta estrategia aumenta

al considerar el valor de los materiales y la energía evitada, ya que este ahorro se traduce en un crédito de 0,723 €/kg, equivalente a 9.037 € por pala. En consecuencia, el beneficio neto por unidad alcanza los 6.889 €, lo que convierte esta opción en una alternativa económicamente muy atractiva [45]. Se obtiene mayor rentabilidad en parques con palas grandes, donde los costes fijos pueden distribuirse de forma más eficiente [71].

Desde el punto de vista energético, la extensión de vida útil también resulta favorable. El consumo energético asociado a operaciones y mantenimiento, durante la vida útil, se duplica durante el periodo de extensión. Para palas de 12,500 kilogramos, esto supone un consumo de 0,83 MJ/kg por año [18]. Esta cifra es considerablemente inferior al consumo energético de otros procesos como la pirólisis (21,2 MJ/kg) o el lecho fluido (22,2 MJ/kg), lo que posiciona a la extensión de vida como una de las opciones con menor demanda energética. No obstante, esta estrategia no está exenta de limitaciones: requiere inspecciones rigurosas y planes de mantenimiento preventivo, ya que los defectos acumulados con el tiempo pueden afectar la integridad estructural y la seguridad de las palas [18]

Esta estrategia se alinea de forma directa con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la ONU. En primer lugar, contribuye al ODS 12: Producción y consumo responsables, al reducir la generación de residuos y minimizar el uso de nuevos materiales, promoviendo un uso más eficiente de los recursos disponibles. También respalda el ODS 13: Acción por el clima, ya que al evitar la fabricación de nuevas palas y reducir la necesidad de procesos intensivos en energía, como el reciclaje térmico o químico, se disminuye el consumo energético y, por tanto, las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, al prolongar la vida útil de los aerogeneradores con un consumo energético muy inferior al de otros métodos de gestión de residuos, esta estrategia apoya el ODS 7: Energía asequible y no contaminante, al contribuir a un sistema energético más sostenible. Por último, al fomentar la innovación tecnológica en procesos de inspección, mantenimiento y refuerzo estructural, se impulsa también el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura. En conjunto, esta alternativa no solo ofrece beneficios económicos y técnicos, sino que también refuerza el compromiso del sector eólico con la sostenibilidad a largo plazo.

En conclusión, la extensión de vida útil para palas de 2 MW fabricadas en fibra de vidrio representa una solución técnica y económicamente viable, con un excelente balance entre coste, recuperación de valor y demanda energética, además de reforzar el compromiso del sector eólico con la sostenibilidad a largo plazo.

6. Conclusiones

Del presente Trabajo Fin de Grado, cuyo objetivo ha sido analizar la viabilidad técnica, económica y ambiental de las diferentes vías de reciclaje de palas de aerogenerador, así como explorar estrategias complementarias como la extensión de su vida útil, se pueden extraer las siguientes conclusiones principales.

- El reciclaje mecánico es una opción viable a corto plazo gracias a su bajo consumo energético, simplicidad operativa y elevada tasa de recuperación de materiales (hasta un 95 %), lo que lo convierte, en la actualidad, en una de las alternativas más sostenibles ambientalmente.
- Las limitaciones técnicas del proceso, como la incapacidad de separar la fibra y la matriz polimérica, reducen la calidad del material reciclado y restringen su aplicación en productos.
- Otras alternativas como el vertido en vertederos, cada vez menos empleada, son ambientalmente insostenibles y contrarias a la legislación vigente, por lo que su eliminación progresiva resulta necesaria.
- Los procesos térmicos, como la pirólisis y el lecho fluidizado, ofrecen mejores resultados en cuanto a calidad de la fibra recuperada, pero implican un alto consumo energético y mayores emisiones, lo que reduce su sostenibilidad en comparación con el reciclaje mecánico o la extensión de vida útil.
- La solvólisis representa una opción emergente prometedora, ya que permite recuperar fibras con buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, en la actualidad no existen datos suficientes sobre su rendimiento técnico, económico y ambiental a escala industrial que permitan considerarla una solución consolidada.
- La extensión de vida útil de las palas es una alternativa preventiva, rentable desde el punto de vista económico y energético, retrasando la generación de residuos y la necesidad de emplear nuevos materiales para la producción de palas. Es una opción viable siempre que se realicen inspecciones técnicas y de mantenimientos adecuadas.

Finalmente, se concluye que la gestión de las palas de aerogenerador al final de su ciclo de vida debe abordarse con medidas preventivas y procesos de reciclaje eficiente. Las tecnologías más avanzadas como la solvólisis aún se encuentran en la fase de desarrollo. Por tanto, a corto y medio plazo, la combinación de extensión de vida útil y el reciclaje mecánico se presenta como la opción más factible y sostenible para la gestión de esto residuos compuestos.

7. Bibliografía

[1] Aliabadi, Y., Noorollahi, Y., Asgari, O., Rezazadeh, M., & Moltames, R. (2025). High share of renewables in energy system planning through integration of wind energy. Energy Conversion and Management: X, 100899.

[2] Mitigation, C. C. (2011). IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. Renewable Energy, 20(11).

[3] Espejo Marín, C. (2004). La energía eólica en España. Investigaciones geográficas, nº 35, 2004; pp. 45-65.

[4] Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Ortega-López, V., & Manso, J. M. (2023). Raw-crushed wind-turbine blade: Waste characterization and suitability for use in concrete production. Resources, Conservation and Recycling, 198, 107160.

[5] Raso, C. (30 del 01 de 2025). España solo ha repotenciado el 3% de la flota eolia con más antigüedad. Obtenido de El Economista del España solo ha repotenciado el 3% de la flota eólica con más antigüedad Consultado el 20 de marzo de 2025

[6] Medina, M. Á. (2024, diciembre 17). *Cómo pasar de 139 aerogeneradores a 22 y producir más energía: así funciona la repotenciación y el reciclaje de parques eólicos*. El País. Consultado 28/5/2025 Cómo pasar de 139 aerogeneradores a 22 y producir más energía: así funciona la repotenciación y el reciclaje de parques eólicos | Clima y Medio Ambiente | EL PAÍS

[7] Raso, C. (2025, enero 30). *España solo ha repotenciado el 3% de la flota eólica con más antigüedad*. El Economista Consultado 28/5/2025 España solo ha repotenciado el 3% de la flota eólica con más antigüedad

[8] The Wind Power. (s.f.). *Castelo wind farm*. (consultado el 20 de mayo de 2025) https://www.thewindpower.net/windfarm_es_1924_castelo.php

[9] Cadena SER. (2023, 4 de agosto). Publicado el impacto ambiental de un parque eólico en 3 municipios de A Coruña. https://cadenaser.com/galicia/2023/08/04/publicado-el-impacto-ambiental-de-un-parque-eolico-en-3-municipios-de-a-coruna-radio-coruna/ (consultado el 20 de mayo de 2025)

[10] **ACCIONA Energía. (s.f.).** *Repotenciación del Parque eólico Tahivilla*. https://www.eolicotahivilla.es/ (consultado el 20 de mayo de 2025

[11] Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Consultado el 15 de marzo de 2025 en https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

[12] Asociación Empresarial Eólica. (2021). Economía circular en el sector eólico: Palas de los aerogeneradores. https://aeeolica.org/wp-content/uploads/2021/12/AEE-2021-Economia-Circular-en-el-sector-eolico_Palas-de-los-Aerogeneradores.pdf

[13] Mishnaevsky Jr, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). Materials for wind turbine blades: An overview. Materials, 10(11), 1285.

[14] Gkantou, M., Rebelo, C., & Baniotopoulos, C. (2020). Life cycle assessment of tall onshore hybrid steel wind turbine towers. Energies, 13(15), 3950.

[15] Asociación Empresarial Eólica. (2022). Opciones de fin de vida de las palas de los aerogeneradores. Recuperado de https://aeeolica.org/wp-content/uploads/2022/12/AEE-Opciones-de-Fin-de-Vida-de-las-Palas-de-los-Aerogeneradores-v2022-vFinal.pdf

[16] Iberdrola. (s.f.). Reciclaje de palas eólicas, un nuevo reto para la energía mundial. Iberdrola. Consultado el 20 de marzo de 2025, de https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/reciclaje-palas-eolicas

[17] Shen, Y., Apraku, S. E., & Zhu, Y. (2023). Recycling and recovery of fiber-reinforced polymer composites for end-of-life wind turbine blade management. Green Chemistry, 25(23), 9644-9658.

[18] Liu, P., Meng, F., & Barlow, C. Y. (2019). Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison. Journal of Cleaner Production, 212, 1268-1281.

[19] Funes Ruiz, J. F. (2009). Análisis simplificado de la respuesta estructural de una pala de aerogenerador.

[20] Caisaguano, J. R. Z., Tapia, L. Á. C., & Guevara, F. A. J. (2022). Análisis sistemático de estructuras de materiales compuestos (carbono-epoxi) tipo sándwich, utilizadas en aplicaciones aeronáuticas. Dominio de las Ciencias, 8(2), 886-906.

[21] Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., & Zafar, S. (2021). A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades. Composites part B: engineering, 215, 108768.

[22] Jiménez, D., Valdes, K., González, R., & Montero-Prado, P. (2022). Planificación para la reutilización y reciclaje de las palas de aerogeneradores de fibra de vidrio y carbono. I+ D Tecnológico, 18(2), 89-99.

[23] Superuse Studios. (n.d.). Blade Made. Superuse Studios. https://www.superuse-studios.com/projectplus/blade-made/

[24] Patowary, K. (2017, enero 10). The second life of wind turbine blades. Amusing Planet. Recuperado de https://www.amusingplanet.com/2017/01/the-second-life-of-wind-turbine-blades.html (accedido 7/04/2025)

[25] Energy Supply. (2021, 9 de noviembre). Vindmøllevinge får nyt liv på Aalborg Havn. Energy-supply.dk. Consultado el 7 de abril de 2025 de Vindmøllevinge får nyt liv på Aalborg Havn

[26] Yazdanbakhsh, A., Bank, L. C., Rieder, K. A., Tian, Y., & Chen, C. (2018). Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades. Resources, Conservation and Recycling, 128, 11-21.

[27] Fraisse, A., Beauson, J., Brøndsted, P., & Madsen, B. (2016, July). Thermal recycling and re-manufacturing of glass fibre thermosetting composites. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 139, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.

[28] Kouparitsas, C. E., Kartalis, C. N., Varelidis, P. C., Tsenoglou, C. J., & Papaspyrides, C. D. (2002). Recycling of the fibrous fraction of reinforced thermoset composites. Polymer composites, 23(4), 682-689.

[29] Yang, W., Kim, K. H., & Lee, J. (2022). Upcycling of decommissioned wind turbine blades through pyrolysis. Journal of cleaner production, 376, 134292.

[30] Ge, L., Li, X., Feng, H., Xu, C., Lu, Y., Chen, B., ... & Xu, C. (2023). Analysis of the pyrolysis process, kinetics and products of the base components of waste wind turbine blades (epoxy resin and carbon fiber). Journal of analytical and applied pyrolysis, 170, 105919.

[31] Spini, F., & Bettini, P. (2024). End-of-Life wind turbine blades: Review on recycling strategies. Composites Part B: Engineering, 275, 111290.

[32] Piñero-Hernanz, R., García-Serna, J., Dodds, C., Hyde, J., Poliakoff, M., Cocero, M. J., ... & Lester, E. (2008). Chemical recycling of carbon fibre composites using alcohols under subcritical and supercritical conditions. The Journal of Supercritical Fluids, 46(1), 83-92.

[33] Ahrens, A., Bonde, A., Sun, H., Wittig, N. K., Hammershøj, H. C. D., Batista, G. M. F., ... & Skrydstrup, T. (2023). Catalytic disconnection of C–O bonds in epoxy resins and composites. Nature, 617(7962), 730-737.

[34] Márquez Sobrino, P. (2024). Evolución y perspectiva de la normativa de gestión de residuos en las instalaciones de energía renovable. European Public & Social Innovation Review, 9, 1–19. https://doi.org/10.31637/epsir-2024-845 (de aquí sé que leyes coger)

[35] Unión Europea. (2008). Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, relativa a los residuos y por la que se deroga cierta legislación en materia de residuos. Diario Oficial de la Unión Europea, L 312, 3-30. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098

[36] Sproul, E. G., Khalifa, S. A., & Ennis, B. L. (2024). Environmental and Economic Assessment of Wind Turbine Blade Recycling Approaches. ACS Sustainable Resource Management, 2(1), 39-49.

[37] Unión Europea. (2020). Reglamento (UE) 2020/852 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de junio de 2020, por el que se establece un marco para facilitar las inversiones sostenibles [Reglamento de Taxonomía]. Diario Oficial de la Unión Europea. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj

[38] Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. (2011). Boletín Oficial del Estado, n.º 179, 29 de julio de 2011. https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-12423

[39] Unión Europea. (2011). Reglamento (UE) nº 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2011, por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción. Diario Oficial de la Unión Europea. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0305

[40] Unión Europea. (2012). Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Diario Oficial de la Unión Europea. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex:32012L0019

[41] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Estrategia Española de Economía Circular – España Circular 2030. Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia.html

[42] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2024-2035. BOE. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2025-1118

[43] Karuppannan Gopalraj, S., & 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, 2(3), 433

[44] Fonte, R., & Xydis, G. (2021). Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. Journal of environmental management, 287, 112269.

[45] Liu, P., Meng, F., & Barlow, C. Y. (2022). Wind turbine blade end-of-life options: An economic comparison. Resources, Conservation and Recycling, 180, 106202.

[46] Yepes, V. (2023, noviembre 7). GRC. El blog de Víctor Yepes. Universitat Politècnica de València. Consultado 20/5/2025 https://victoryepes.blogs.upv.es/2023/11/07/grc/

[47] Iberia Compositech. (2019, 3 de mayo). Fibra de carbono: propiedades más notables y aplicaciones. Iberia Compositech. Consultado 20/5/2025 https://www.iberiacompositech.com/es/fibra-de-carbono-propiedades-mas-notables-y-aplicaciones/

[48] Wei, Y., & Hadigheh, S. A. (2022). Cost benefit and life cycle analysis of CFRP and GFRP waste treatment methods. Construction and Building Materials, 348, 128654.

[49] Zhang, Y., Van Caneghem, J., Pontikes, Y., Granata, G., Lessard, L., & Van Vuure, A. W. (2025). Environmental and economic assessment of mechanical recycling of end-of-life wind turbine blades into rebars and comparison with conventional disposal routes. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 190, 108711.

[50] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022). Incineración de residuos municipales con valorización energética. Sistema Español de Inventario de Emisiones. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/090201-incinera-rsu-valoriz_tcm30-456067.pdf

[51] Iberdrola. (2025). Reciclaje de palas eólicas, un nuevo reto para la energía mundial. Recuperado de https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/reciclaje-palas-eolicas

[52] Tao, Y., Hadigheh, S. A., & Wei, Y. (2023, July). Recycling of glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite wastes in concrete: A critical review and cost benefit analysis. In Structures (Vol. 53, pp. 1540-1556). Elsevier.

[53] iResiduo. (2021, 2 de junio). Josep Maria Tost: "Tirar residuos al vertedero es un chollo". iResiduo. https://iresiduo.com/noticias/espana/fundacion-conama/21/06/02/josep-maria-tost-tirar-residuos-al-vertedero-es-chollo

[54] Radio Huesca. (2025, 24 de enero). La Comarca de Los Monegros aprueba definitivamente las ordenanzas y precios públicos para 2025. Cadena SER. https://cadenaser.com/aragon/2025/01/24/la-comarca-de-los-monegros-aprueba-definitivamente-las-ordenanzas-y-precios-publicos-para-2025-radio-huesca/

[55] Gestores de Residuos. (2020, 20 de julio). El nuevo RD del MITECO implica un aumento de 800 millones al año en las tasas de basura. https://gestoresderesiduos.org/noticias/el-nuevo-rd-del-miteco-implica-un-aumento-de-800-millones-al-ano-en-las-tasas-de-basura

[56] Díaz Pardo, C. (2025, 4 de febrero). Naturgy, Iberdrola y Endesa tienen en marcha repotenciaciones por 280 millones en plena guerra entre Xunta y eólicas. Economía Digital. Consultado 15/5/2025 https://www.economiadigital.es/galicia/empresas/quien-repotencia-parques-eolicos-galicia-y-cuanto-cuesta-iberdrola-naturgy-endesa.html

[57] Bloomberg. (2020, 5 de febrero). *Wind turbine blades can't be recycled, so they're piling up in landfills* (consultado el 20 de mayo de 2025.https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills

[58] Pickering, S. J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. Composites Part A: applied science and manufacturing, 37(8), 1206-1215.

[59]Yun, Y. M., Seo, M. W., Koo, G. H., Ra, H. W., Yoon, S. J., Kim, Y. K., ... & Kim, J. H. (2014). Pyrolysis characteristics of GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) under non-isothermal conditions. Fuel, 137, 321-327.

[60]Kim, E., Lautenberger, C., & Dembsey, N. (2009). Property estimation for pyrolysis modeling applied to polyester FRP composites with different glass contents. Fire and Material.

[61] Thermal Engineering. (s.f.). ¿Cómo funciona un reactor de lecho fluidizado? Consultado 25/572025. https://www.thermal-engineering.org/es/como-funciona-un-reactor-de-lecho-fluidizado/

[62] Poviña, E., Naddeo, I. V., Belgiorno, I. V., & Giaquinto, I. D. (2021). Wind farms: End of life perspectives within the circular economy framework. DOI:10.13140/RG.2.2.22731.72480

[63] Inquipco. (s.f.). *Parts & service*. (consultado el 20 de mayo de 2025) https://inquipco.com/parts-service/

[64] López, A. (2023, 28 de enero). Una veintena de parques eólicos autorizados por la Xunta en reservas de la biosfera. La Voz de Galicia. Consultado 15/5/2025. https://www.lavozdegalicia.es/noticia/economia/2023/01/28/veintena-parques-eolicos-autorizados-xunta-reservas-biosfera/00031674912676510489881.htm

[65] León24horas. (2025, 25 de febrero). Revocada la autorización ambiental para la planta de reciclaje de palas eólicas de Cubillos del Sil tras la renuncia de Grineo al proyecto. León24horas. Consultado 20/05/2025 https://leon24horas.net/actualidad/revocada-la-autorizacion-ambiental-para-la-planta-de-reciclaje-de-palas-eolicas-de-cubillos-del-sil-tras-la-renuncia-de-grineo-al-proyecto

[66] Heraldo de León. (2024, 28 de noviembre). Cubillos del Sil pierde de forma definitiva su planta de reciclaje de palas eólicas. Heraldo de León. Consultado 20/05/2025 https://www.heraldodeleon.es/articulo/el-bierzo/cubillos-sil-pierde-forma-definitiva-planta-reciclaje-palas-eolicas/20241128121056003255.html

[67] ACE Cargadores. (2020). *Guía cálculo CO2 AECOC* [Boletín 864]. Guía cálculo huella carbono transporte carretera.indd (consultado el 20 de mayo de 2025)

[68] Prattsburgh Wind, LLC. (2022, June 6). Prattsburgh Windfarm decommissioning costs analysis report (Document No. 10304479-HOU-R-01, Issue B, Final). https://documents.dps.ny.gov/public/Common/ViewDoc.aspx?DocRefId=%7BFD4DB273-C38B-463D-872D-77B08B19CE9C%7D

[69] Martín Gobernado, L. (2024). Análisis de Ciclo de Vida y Costes de las palas de los aerogeneradores: Comparación de alternativas de reciclaje.

[70] Ziegler, L., Gonzalez, E., Rubert, T., Smolka, U., & Melero, J. J. (2018). Lifetime extension of onshore wind turbines: A review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 1261-1271.]

[71] Beauson, J., & Brøndsted, P. (2016). Wind turbine blades: an end of life perspective. MARE-WINT: new materials and reliability in offshore wind turbine technology, 421-432.