

Revisión de métodos de reciclaje enfocado a las aspas de aerogeneradores en México


Review of recycling methods focused on wind turbine blades in Mexico

Revisão dos métodos de reciclagem focados em pás de turbinas eólicas no México

ARTÍCULO ORIGINAL



José Luis Colín Martínez¹ 
jose.colin@ciateq.mx

Victor López Garza² 
victor.garza@umich.mx

Guillermo Muñoz Hernández¹ 
guillermo.munoz@ciateq.mx

¹CIATEQ, Centro de Tecnología Avanzada, Querétaro. Querétaro, México
²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia. Michoacán, México

Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v8i22.127>

Artículo recibido 17 de julio 2024 / Aceptado 21 de agosto 2024 / Publicado 23 de octubre 2024

RESUMEN

La sostenibilidad y el impacto ambiental de las energías renovables es objeto de una creciente preocupación que, ha llevado a un enfoque renovado en el reciclaje de componentes de aerogeneradores, particularmente las aspas. El objetivo es analizar los métodos de reciclaje enfocado a las aspas de aerogeneradores en México. El enfoque es mixto, combinando métodos cualitativos como cuantitativos. Para recoger la información se utilizó la revisión documental y un análisis de la literatura sobre aspas de aerogeneradores. Los resultados muestran que, a medida que la energía eólica crece como una fuente de energía renovable, la gestión adecuada de los residuos generados por las palas que, se convierte en un aspecto crítico para asegurar la sostenibilidad del sector. Se concluye que, para alcanzar una gestión sostenible y eficiente de estos residuos, es fundamental explorar métodos físicos como la trituración mecánica. Este enfoque no solo reduce costos de transporte, sino que también facilita el manejo en sitios especializados cercanos a los centros de uso de productos de fibra de vidrio.

Palabras clave: Aerogenerador; Aspa; Método; Reciclaje

ABSTRACT

The sustainability and environmental impact of renewable energy is a growing concern, leading to a renewed focus on recycling wind turbine components, particularly blades. The objective is to analyze the recycling methods focused on wind turbine blades in Mexico. The approach is mixed, combining qualitative and quantitative methods. A documentary review and an analysis of the literature on wind turbine blades were used to collect information. The results show that, as wind energy grows as a renewable energy source, the proper management of the waste generated by the blades becomes a critical aspect to ensure the sustainability of the sector. It is concluded that, to achieve sustainable and efficient management of this waste, it is essential to explore physical methods such as mechanical shredding. This approach not only reduces transportation costs, but also facilitates handling in specialized sites close to the centers of use of fiberglass products.

Key words: Wind turbine; Wind blade; Method; Recycling

RESUMO

A sustentabilidade e o impacto ambiental das energias renováveis são objeto de preocupação crescente, o que levou a um foco renovado na reciclagem dos componentes das turbinas eólicas, especialmente das pás. O objetivo é analisar métodos de reciclagem focados em pás de turbinas eólicas no México. A abordagem é mista, combinando métodos qualitativos e quantitativos. Para coletar as informações, utilizou-se uma revisão documental e uma análise da literatura sobre pás de turbinas eólicas. Os resultados mostram que, à medida que a energia eólica cresce como fonte de energia renovável, a gestão adequada dos resíduos gerados pelas pás torna-se um aspecto crítico para garantir a sustentabilidade do setor. Conclui-se que, para alcançar uma gestão sustentável e eficiente destes resíduos, é essencial explorar métodos físicos como a trituração mecânica. Essa abordagem não apenas reduz os custos de transporte, mas também facilita o manuseio em locais especializados próximos aos centros de utilização de produtos de fibra de vidro.

Palavras-chave: Turbina eólica; Pás de vento; Método; Reciclagem

INTRODUCCIÓN

Esta última década la creciente preocupación por la sostenibilidad y el impacto ambiental de las energías renovables ha llevado a un enfoque renovado en el reciclaje de componentes de aerogeneradores, particularmente las aspas. Desde un contexto internacional, se estima que el reciclaje de palas de aerogeneradores es un desafío significativo, ya que estas estructuras están compuestas principalmente de materiales compuestos como la fibra de vidrio y resinas termoendurecibles, que son difíciles de procesar al final de su vida útil. Según Robbertsen (2021), en un futuro muy cercano habrá que reciclar alrededor del 80% de los molinos porque hay menos espacio para las turbinas eólicas usadas. Esta realidad, resalta la necesidad urgente de desarrollar tecnologías efectivas para el reciclaje, que no solo minimicen los residuos, sino que también promuevan la economía circular en el sector energético.

En este sentido, un estudio relevante en este campo es el realizado por Vergara-Quezada et al. (2020), estos proponen un innovador método basado en el pirólisis para reciclar las palas de aerogeneradores. Este procedimiento no solo busca recuperar fibras de vidrio y carbono, sino también optimizar la separación de estos materiales de las resinas, lo que podría resultar en una alta pureza y resistencia mecánica en los materiales recuperados. La investigación anticipa

que este proceso podría facilitar la reintegración de materiales reciclados en diversas aplicaciones industriales, contribuyendo así a una gestión más sostenible de los residuos generados por la industria eólica. Estos avances son cruciales para enfrentar los retos que vienen de la mano al final de vida útil de los aerogeneradores y para asegurar que el crecimiento del sector eólico sea verdaderamente sostenible.

Actualmente la industria eólica produce grandes cantidades de palas para aerogeneradores que están fabricadas principalmente de material compuesto de resina polimérica con refuerzo de fibra de vidrio. Este material tiene muy buenas propiedades mecánicas, pero al final de su vida útil o separar los materiales que lo componen. Por lo que se deben de buscar métodos de reciclaje que sean sostenibles, rentables y con bajo impacto ambiental. Es por eso por lo que se propone evaluar un método de reciclaje. Después proponer el método y proporcionar una aplicación específica para aprovechar los residuos que sirvan para nuevos productos.

En este contexto, una de las problemáticas principales son los residuos inorgánicos resultado del desecho de las palas eólicas, ya que estos tardan muchos años en degradarse y terminan principalmente en vertederos dañando el medio ambiente y la salud de los seres vivos. Las palas de los aerogeneradores están compuestas por materiales difíciles de reciclar por su naturaleza

y cada vez se instalan más turbinas en el mundo por lo que se visualiza que en un futuro cercano existirán toneladas de palas desechadas. Por lo que uno de los retos es proponer soluciones para el manejo de estos residuos, así como generar una economía circular para la reutilización y el reciclaje de palas.

Teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación pretende informar a las comunidades cercanas a los parques eólicos en México sobre las opciones disponibles para la gestión de los desechos generados por el desmantelamiento de las aspas. Es fundamental que estas localidades comprendan que, al quedar las aspas desmanteladas en sus tierras, podrían ocupar espacio valioso y, con el tiempo, representar un riesgo para la salud pública debido a los componentes tóxicos que contienen. Por lo tanto, es crucial promover alternativas adecuadas para la disposición de estos materiales y minimizar su impacto ambiental. La generación de energía eléctrica a partir de la energía eólica es una tecnología relativamente joven, considerando que las primeras generaciones están por cumplir su vida útil, que oscila entre los 20 y 25 años (Jiménez y Valdes, 2022). En este sentido, es necesario considerar que un importante número de parques eólicos están por ser desmantelados.

Por otro lado, el mismo autor asegura que, experiencias previas indican que la mayor cantidad

de partes de las turbinas eólicas, como las bases, soporte principal, las unidades de transmisión y el propio generador, son relativamente reciclables. No obstante, la principal problemática, en el desmantelamiento de esas estructuras, lo representan las palas debido a los diferentes materiales que las componen. Debido a esto, se genera un nuevo desafío para este sector de energía renovable, la adecuada disposición y el reciclaje de los desechos generados al final de su vida útil.

Ahora bien, los materiales utilizados para fabricar aspas son principalmente materiales compuestos (fundamentalmente la fibra de vidrio o carbono y resinas, difíciles de separar), con diferentes propiedades, que permiten optimizar el diseño de los aerogeneradores mediante la fabricación de palas livianas y de gran longitud, con una forma aerodinámica perfeccionada. Este tipo de materiales ha permitido aumentar progresivamente el tamaño de los aerogeneradores y extender su uso a los parques eólicos marinos, donde las dimensiones conseguidas para las máquinas son todavía mayores (Asociación Empresarial Eólica AEE, 2021). En una pala eólica existen varios materiales que la componen los cuales se muestran en la Figura 1.

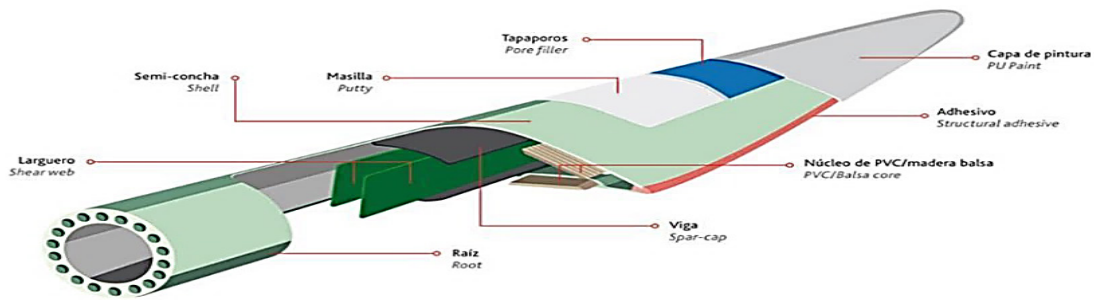


Figura 1. Componentes principales de un asa. AEE, (2021).

En términos generales las aspas, están fabricadas con materiales compuestos y estos no sólo se utilizan en las palas de los aerogeneradores, sino que son materiales importantes en sectores como la automoción, el transporte marítimo, la aeronáutica o la

construcción (Fernández, 2022). La industria eólica se encuentra en el quinto lugar de disposición de residuos en una proyección hacia el año 2025 dentro de las industrias que trabajan con estos materiales tal y como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Proyección de residuos de la industria de productos de material compuesto.

Al mismo tiempo, la primera generación de aerogeneradores en México está llegando al fin de su vida operativa. En los próximos años, muchos parques eólicos deberán optar entre extender la vida útil de sus activos, o llevar a cabo una repotenciación para sustituir los aerogeneradores antiguos por otros más modernos. De acuerdo con la información consultada en (Vestas, 2003) el 9.5 % de los materiales de un aerogenerador

Vestas V27/225 está fabricado de materiales compuestos, destacando que las aspas representan un 86% de fibra de vidrio que se encuentran en estos componentes como se muestra en la Figura 3 y en este caso se tendría un peso de más de una tonelada de las tres palas por lo cual al final de su vida útil se tendría que disponer de esta cantidad por cada aerogenerador desmontado.

Material	Góndola	Rotor	Torre	Total (kg)
Cantidad (kg)				
Acero	6,192.5	647.0	12,045.0	18,884.5
Cobre	400.0	0.0	125.0	525.0
Fibra de Vidrio	300.0	1,880.0	0.0	2,180.0
Fundición de hierro	1,027.0	450.0	0.0	1,477.0
Poliuretano	0.5	3.0	0.0	3.5
Total (kg)	7,920.0	2,980.0	12,170.0	23,070.0
Porcentaje (%)	34.3	12.9	52.7	100

Figura 3. Materiales para la fabricación del aerogenerador Vestas V27/225. [4].

El problema con las palas actuales es que los procesos de recuperación de materiales son complejos y a veces costosos. Además, los materiales no pueden recuperarse totalmente, ya que no fueron diseñadas pensando en su reciclaje desde el principio. Por ese motivo, los fabricantes de aerogeneradores se han puesto manos a la obra para diseñar palas que sean 100% reciclables mediante procesos más sencillos (Fernández, 2022). En atención a la situación planteada, el objetivo del estudio es analizar los métodos de reciclaje enfocado a las aspas de aerogeneradores en México

METODOLOGÍA

Para la realización de este estudio, se empleó un diseño de investigación mixto, combinando tanto métodos cualitativos como cuantitativos, esto permitió una comprensión más integral del tema al abordar tantos datos numéricos sobre la cantidad de residuos generados como narrativas

sobre las experiencias locales con el reciclaje. Este estudio se basó en un enfoque constructivista, que considera que el conocimiento se construye de manera social y contextual. A través de la revisión documental, se buscó entender cómo diferentes metodologías de reciclaje han sido implementadas en diversas partes del mundo, y cómo estas experiencias pueden ser relevantes para el contexto mexicano. La combinación provista por el enfoque permite integrar las perspectivas teóricas y prácticas que favorecen la comprensión del fenómeno estudiado.

Para recoger la información se utilizó la revisión documental a través del análisis de la literatura existente del tema de aspas de aerogeneradores. Esto incluyó artículos académicos, informes, estudios y documentos de políticas públicas. Finalmente se aplicó un análisis de contenido a los documentos lo que identificó tendencias, desafíos y oportunidades de los métodos de reciclaje.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Las condiciones actuales en cuanto generación de energía eólica en México y la estimación de aspas que se encuentran instaladas actualmente y las que se van a disponer en los próximos años. Una vez visto el impacto que estos componentes se realiza una investigación de los principales métodos utilizados para el reciclaje de materiales compuestos, tomando como referencia los que se utilizan en la Unión Europea en donde ya se están planteando soluciones a esta problemática de los residuos de aspas de aerogeneradores. Se evaluaron varios factores para de los métodos de reciclaje para ver cuál es el más conveniente para su aplicación en los campos eólicos de México.

Actualmente, México cuenta con un potencial eólico de más de 50,000 MW eólicos y se requieren utilizar tan sólo alrededor de 17,000 MW para alcanzar el objetivo de generar 35% de energía eléctrica con tecnologías limpias para el

año 2025, dejando un amplio espacio para otras tecnologías (Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE, 2022)).

Con datos proporcionados por AMDEE, (2022) hasta 2022, México cuenta con parques eólicos en 15 estados de los cuales tiene una capacidad instalada de 7,312 MW principalmente en Oaxaca y Tamaulipas, como se muestra en la figura 4. Esto quiere decir que solo el 15% del potencial se está utilizando actualmente por lo que hay una gran proyección futura para que se instalen más aerogeneradores en los siguientes años. Por otro lado, por el momento hay 3,201 turbinas instaladas en el territorio nacional lo que quiere decir que hay en operación más de nueve mil palas las cuales su tiempo de vida útil actual ronda de los 5 a los 10 años. Con esto ya se tiene un panorama general de la necesidad que está surgiendo por el reciclaje de palas de estas turbinas, Figura 4.

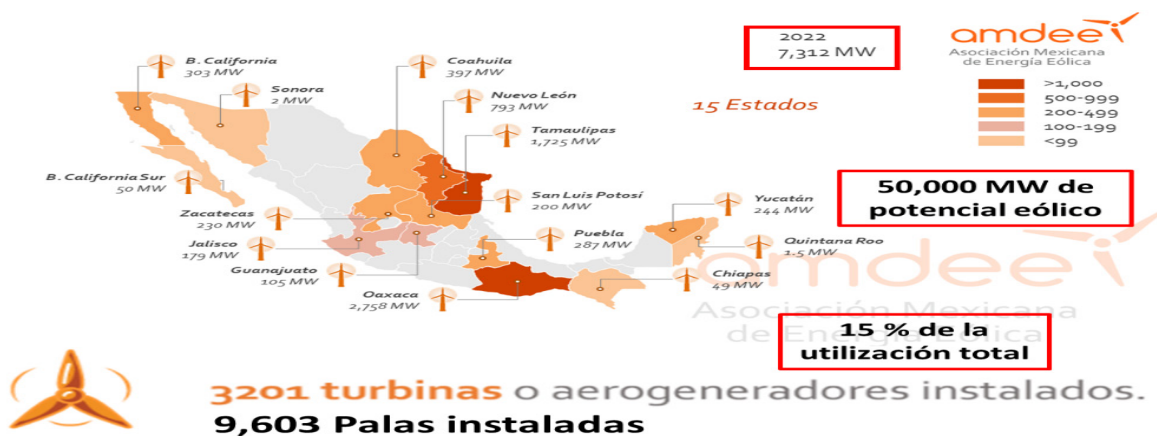


Figura 4. Capacidad y aerogeneradores instalados en la república mexicana.

En México existen varios proyectos de parques instalados los cuales se desarrollaron en varios momentos en el tiempo, la Figura 5 muestra los principales aerogeneradores que hay, su fecha de implementación y tomando de referencia que la vida útil de una pala es de 20 años podemos observar que el parque de la venta I ya llegó al final de su funcionamiento y la venta II en dos años

estarán desmantelando las aspas, considerando un tamaño de turbina de 2 MW, se estima que para el 2032, alrededor de 600 turbinas habrán desechado de forma gradual lo que traduce en 1800 aspas, además del material de las góndolas, por lo que ya hay una necesidad del manejo de este tipo de residuos ya que actualmente se mandan a vertederos o se dejan sobre los campos.

Proyectos Eólicos en México							
Proyectos Eólicos en Operación							
Proyecto	Ubicación	Esquema	Desarrollador	Turbinas	FOC	MW	
La Venta	Oaxaca	OPF	CFE	Vestas	1994	1.6	
La Venta II	Oaxaca	OPF	CFE	Gamesa	2006	83.3	
Parques Ecológicos de México	Oaxaca	Autoabast.	Iberdrola	Gamesa	2009	79.9	
Eurus, 1st Phase	Oaxaca	Autoabast.	Cemex/Acciona	Acciona	2009	37.5	
Eurus 2nd Phase	Oaxaca	Autoabast.	Cemex/Acciona	Acciona	2010	212.5	
Gobierno Baja California	Baja California	OPF	GBC/Turbo Power Services	Gamesa	2010	10	
Bii Nee Stipa I	Oaxaca	Autoabast.	Cisa-Gamesa	Gamesa	2010	26.35	
La Mata - La Ventosa	Oaxaca	Autoabast.	Eléctrica del Valle de México (EDF-EN)	Clipper	2010	67.5	
						518.63	
Proyectos Eólicos Bajo Construcción							
Proyecto	Ubicación	Esquema	Desarrollador	Turbinas	FOC	MW	
Fuerza Eólica del Istmo	Oaxaca	Autoabast.	Peñoles	Clipper	2010-2011	50	
La Venta III	Oaxaca	PIE	CFE/Iberdrola	Gamesa	2011	101	
Oaxaca II, III y IV	Oaxaca	PIE	CFE/Acciona	Acciona	2011-2012	304.2	
Oaxaca I	Oaxaca	PIE	CFE/EYRA	Vestas	2010	101	
Los Vergeles	Tamaulipas	Autoabast.	GSEER	Siemens	2010-2011	161	
						717.2	
Proyectos Eólicos en Desarrollo							
Proyecto	Ubicación	Esquema	Desarrollador	Turbinas	FOC	MW	
Vientos del Istmo	Oaxaca	Autoabast.	Preneal	Por Definir	2011-2014	395.9	
Fuerza Eólica del Istmo	Oaxaca	Autoabast.	Peñoles	Clipper	2011-2012	30	
Bii Hioxio	Oaxaca	Autoabast.	Unión Fenosa	Por Definir	2011-2014	227.5	
Bii Stinú	Oaxaca	Autoabast.	Eoliatec del Istmo (Eolia)	Por Definir	2011-2013	164	
Santo Domingo	Oaxaca	Autoabast.	Eoliatec del Pacífico (Eolia)	Por Definir	2011-2014	160	
Bii Nee Stipa	Oaxaca	Autoabast.	Cisa-Gamesa	Gamesa	2011-2014	288	
Desarrollo Eólicos Mexicanos	Oaxaca	Autoabast.	Renovalia	Por Definir	2011-2014	227.5	
Unión Fenosa	Baja California	Exportación	Gas Natural/Unión Fenosa	Por Definir	2011-2014	400	
Sempre	Baja California	Exportación	Sempre	Por Definir	2011-2014	1200	
Fuerza Eólica	Baja California	Exportación	Fuerza Eólica	Por Definir	2011-2014	400	
OPF: Obra Pública Financiada						3,492.9	
FOC: Fecha de Operación Comercial						4,728.7	
Total MW							

Figura 5. Proyectos eólicos en México.

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

materiales compuestos resultantes no pueden ser fundidos y es complicado separar la matriz de las fibras de refuerzo (AEE, 2021). Esto supone que la complejidad de los materiales utilizados para la pala requiere de procesos específicos para su reciclaje, como se muestra en la Figura 6.

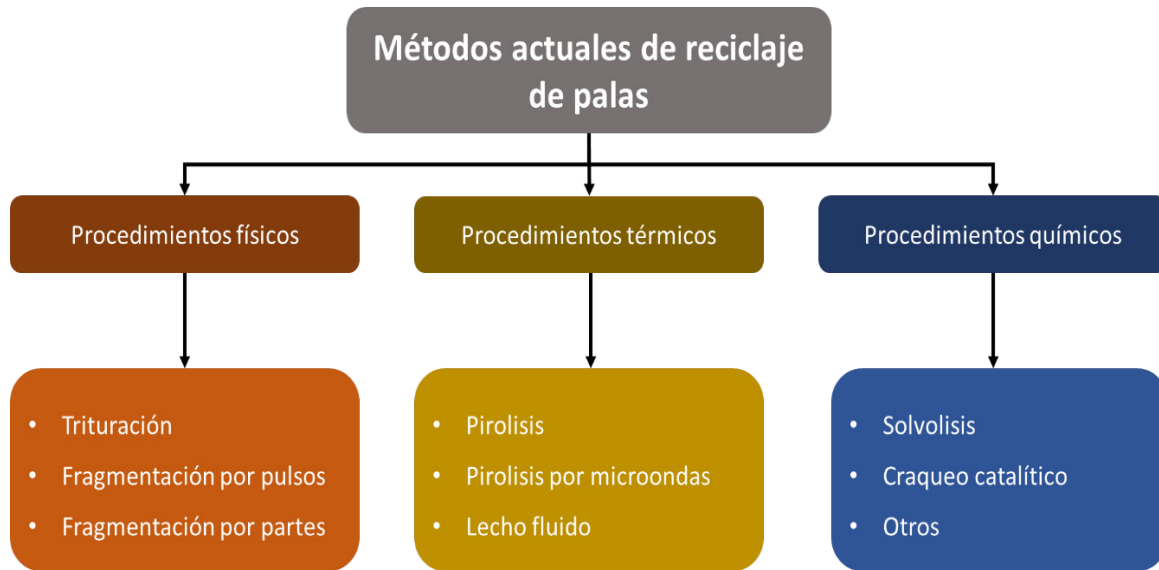


Figura 6. Métodos de reciclaje de materiales compuestos.

Triturado mecánico

En estas plantas de preprocesamiento, las palas son cortadas y trituradas en trozos de pequeño volumen, con un tamaño final de milímetros. Los metales son posteriormente separados mediante imanes del resto de materiales. El triturado mecánico tiene una gran eficiencia, por lo que suele ser ampliamente utilizado debido a su costo bajo y la escasa energía necesaria, pero disminuye drásticamente el valor del material reciclado. El producto obtenido, principalmente fibra de vidrio, puede ser utilizado de relleno o como refuerzo (Nagle, et al., 2020). Realizando una reducción y separación secundaria, se pueden obtener dos tipos de material de diferente morfología: un concentrado de fibras compuesto principalmente por grupos de fibras cubiertas por polímero; y una fracción heterogénea, compuesta por una mezcla de espuma de poliuretano y partículas finas (AEE, 2021).

Fragmentación por pulsos de alta tensión

La fragmentación del material compuesto por pulsos de alta tensión es un proceso electromecánico que separa con alta eficiencia las matrices de las fibras en los materiales compuestos mediante el uso de electricidad. Como ventaja, comparado con el triturado mecánico, las fibras que se obtienen son de mayor calidad, además de tener una mayor longitud y limpieza. Sin embargo, hasta la fecha sólo se han podido recuperar en el proceso fibras de pequeño tamaño y, para conseguir fibras de alta calidad, se requieren grandes niveles de energía. Se trata de una tecnología que se encuentra todavía en fase de investigación (AEE, 2021).

Pirólisis

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

aplicaciones, del cual se obtienen como productos combustible y energía para el propio proceso térmico. Al aplicar la pirolisis a las palas eólicas, la matriz polimérica se degrada hasta conseguir una mezcla de hidrocarburos, obteniendo como

producto del proceso las fibras de vidrio. Aunque las temperaturas utilizadas en este proceso son más bajas que en otras tecnologías, siguen siendo lo suficientemente altas para dañar la superficie de las fibras (AEE, 2021, Figura 7).



Figura 7. Horno de pirolisis.

Pirólisis por microondas

La pirolisis por microondas es un sistema alternativo a la pirolisis convencional, en la cual el material es calentado por radiación microondas, lo que permite que el calentamiento sea uniforme en toda la pieza. Los polímeros habitualmente tienen una conductividad térmica muy baja, por lo que, al recurrir a microondas, la temperatura utilizada puede ser mucho menor, consiguiendo una menor degradación de las fibras de vidrio.

Por tanto, su ventaja primordial es que permitiría conservar mejor las propiedades mecánicas de las fibras de vidrio que se pierden en el caso de la pirolisis convencional, y reducir la cantidad de energía utilizada. Además, se trata de una tecnología que es más controlable (AEE, 2021).

Lecho fluido

El proceso de reciclaje por lecho fluido se utiliza para quemar la resina matriz del material compuesto y poder tener como producto de la combustión las fibras. Para ello, las palas son trituradas hasta conseguir pellets de pequeño tamaño, que son introducidos en el reactor de lecho fluido, donde se pueden alcanzar temperaturas de hasta 550° C. Entre otras ventajas, este método, comparado con los dos anteriores, permitiría retener mejor las propiedades mecánicas y el valor del material, aunque se sigue produciendo una degradación de las fibras obtenidas. Asimismo, permite tratar materiales mixtos y, por lo tanto, sería especialmente beneficioso para residuos de fin de vida (AEE, 2021).

Solvólisis

La solvólisis es un tratamiento químico por el cual se transforma un compuesto con consumo o generación de energía, basándose en una reacción de sustitución. Es decir, un átomo o compuesto es reemplazado por otro utilizando un disolvente que actúa como nucleófilo, como puede ser el agua, el alcohol o un ácido. En el caso de las palas eólicas, los materiales compuestos pueden ser reciclados a través de este tipo de reacción utilizando el agua como disolvente que, bajo unas condiciones específicas, produce en la resina la despolimerización termoquímica. Este proceso provoca la ruptura de los enlaces de las resinas termoestables, permitiendo la separación de estas resinas de las fibras de vidrio (AEE, 2021).

Con base en el conocimiento establecido sobre el uso de los métodos de reciclaje individuales y sus desarrollos históricos y actuales, así como las condiciones y requisitos para cada método, es posible dar una estimación de los métodos y su tecnología basada en los niveles de maduración tecnológica (TRL) (Paulsen y Enevoldsen, 2021). Combinando la escala TRL con el conocimiento sobre las ubicaciones de los diferentes métodos de reciclaje en la jerarquía europea de residuos y los posibles resultados de materiales residuales, es posible comparar los métodos como se muestra en la Tabla 1 como una descripción general.

Tabla 1. Descripción general de los métodos de reciclaje actuales.

Método de reciclaje	Mecánico	Co-Procesamiento	Pirólisis	Pirólisis por microondas	Lecho fluido	Solvólisis	Fragmentación por pulsos
Nivel de TRL	9	8-9	7	4	4-5	5-6	5
Puntaje de gestión de residuos	Bajo	Medio	Alto	Medio/Alto	Medio/Alto	Alto	Medio
Inversión necesaria prevista	Baja	Baja/Media	Baja/Media	Alta	Media	Alta	Alta

En la Figura 8, se muestra el diagrama comparativo del TRL. La puntuación de gestión de residuos se clasifica en tres grupos, bajo, medio y alto, que se basa en las propiedades de los diversos procesos, salida y TRL, pero en particular, en el valor del material residual. La puntuación

individual es indicativa y varía entre los recicladores de la UE que usan el mismo método de reciclaje debido a los diferentes parámetros de procesamiento, capacidad y rendimiento (Paulsen y Enevoldsen, 2021).

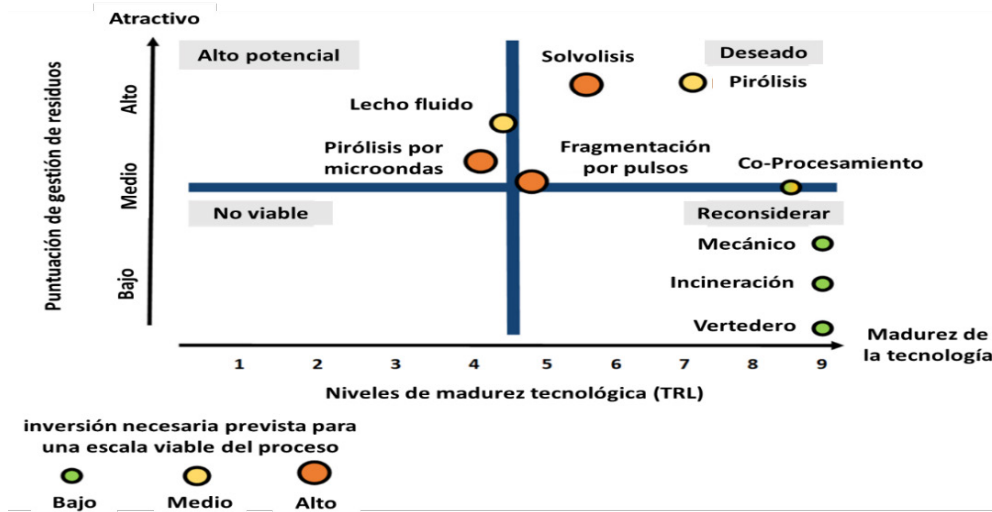


Figura 8. TRL en los diferentes métodos de reciclaje.

De hecho, un estudio de evaluaciones del ciclo de vida reveló que cuando los materiales reciclados reemplazan a los materiales vírgenes en proporciones que brindan una rigidez de material equivalente, la incineración con recuperación de energía (seguida del vertido) generalmente tiene un impacto menor (Oliveux, et al., 2015).

Mientras que cuando los materiales reciclados reemplazan a los materiales vírgenes con proporciones que brindan una rigidez de material equivalente, el reciclaje mostró claros beneficios ambientales (figura 9. Gráfica con el comparativo del impacto ambiental) (Oliveux,

et al., 2015). Un análisis que comparó las emisiones de CO2 relacionadas con componentes automotrices hipotéticos que utilizan materiales vírgenes y materiales reciclados mostró que los componentes que usan materiales reciclados en reemplazo de materiales vírgenes pueden comenzar a ser rentables, gracias al aumento de peso, al recorrer aproximadamente 41,000 km (Oliveux, et al., 2015). Es importante tener en cuenta la vida útil del componente al evaluar el impacto en el medio ambiente y no solo en los procesos de fabricación y reciclaje, Figura 9.

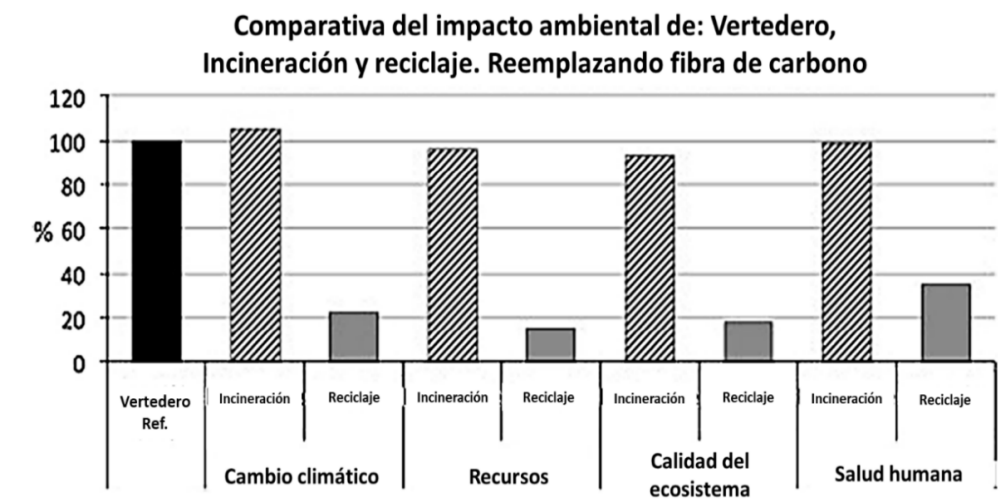


Figura 9. Gráfica con el comparativo de impacto ambiental.

En la Figura 10 a continuación, se muestra una comparación de los diferentes métodos de reciclaje y cuál es su demanda de energía de procesamiento individual. Actualmente, la mayoría de los métodos se basan en el uso del método mecánico como paso inicial para reducir el tamaño de los materiales de desecho a tamaños manejables. El diagrama de la Figura 10 solo muestra la demanda de energía de procesamiento para el método actual, lo que significa que no se agregan operaciones de preprocesamiento u otras que consumen mucha energía. Por lo tanto, la demanda de energía es solo para procesar el método de reciclaje elegido. Con base en la Figura

10, algunos de los métodos de reciclaje indican ser más adecuados para un tipo de material de fibra que para otros. Un ejemplo podría ser el método de reciclaje químico (solvólisis), que tiene una demanda de energía de procesamiento entre 21 y 91 MJ/kg en comparación con la demanda de energía requerida para producir fibra de vidrio virgen (13–32 MJ/kg); lo más probable es que exceda esta demanda, por lo tanto, por lo que no es rentable usarlo para reciclar fibra de vidrio. Esta suposición se basa únicamente en la demanda de energía requerida para el procesamiento de los métodos de reciclaje (Paulsen y P. Enevoldsen, 2021).

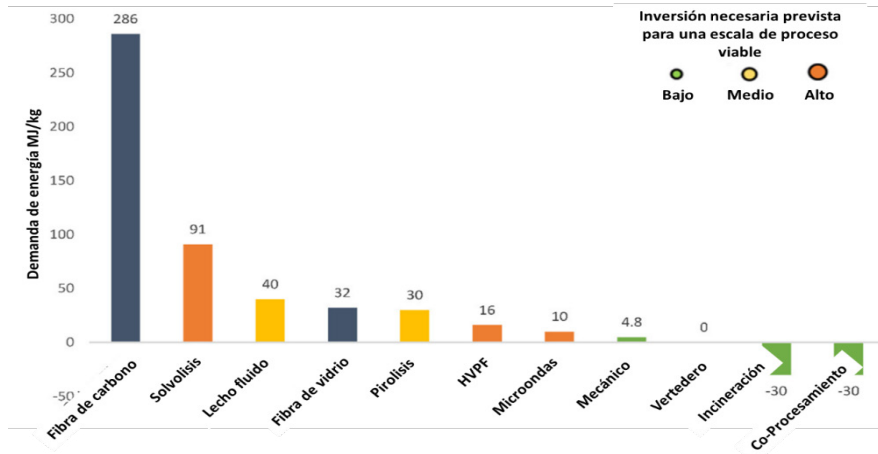


Figura 10. Demanda de energía para los diferentes métodos y para la producción de fibras vírgenes.

En la Figura 11 se muestra la comparación de costos de diferentes métodos de reciclaje en euros por kg en 2018. Las rutas de reciclaje no son rentables en comparación con la incineración y los vertederos. En los métodos de recuperación de fibras, el reciclaje químico es el más costoso y el reciclaje mecánico y la molienda son los menos costosos [9]. Esto hace que el reciclaje químico sea el método más adecuado para recuperar fibras de carbono, donde el costo de las fibras recuperadas es mayor que el costo de procesamiento. Las rutas de reciclado químico y reciclado térmico (pirólisis) se utilizan para recuperar fibras de carbono de

alta calidad. Por el contrario, el reciclaje mecánico puede ser útil para la recuperación de fibras de vidrio. En métodos de no recuperación, o que se van al vertedero los niveles comerciales e industriales reducirán las demandas de energía de estos métodos de reciclaje. La figura 11 muestra que la demanda de energía de reciclaje es entre 10 y 20 veces menor que la energía requerida para producir fibras vírgenes. Un método de reciclaje específico debe proporcionar un compromiso adecuado entre la energía consumida y el costo (Qureshi, 2022).

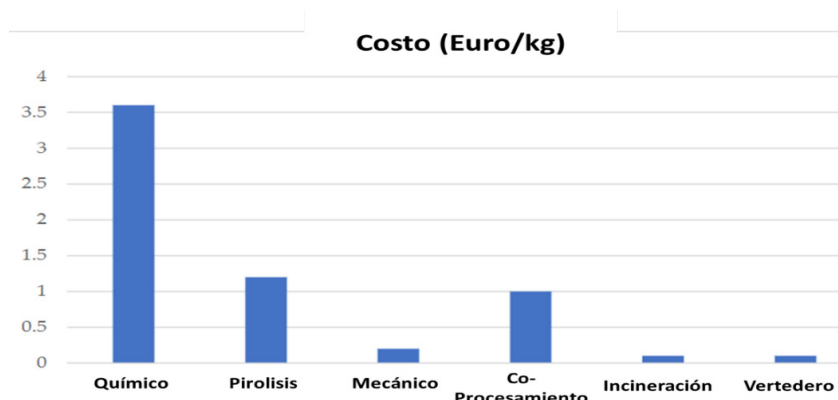


Figura 11. Comparativa de costos en euros por kg de fibras recicladas.

La Tabla 2 demuestra la resistencia a la tracción de una sola fibra descubierta en la literatura. La relación de resistencia entre la fibra reciclada y la original está muy influenciada por parámetros de procesamiento y tipo de material. La fibra de vidrio es más sensible a temperatura de calentamiento y tiempo de residencia en el

reactor. Esta situación explica por qué la fibra de vidrio recuperada tiene una menor retención de la fuerza de la fibra en comparación con la fibra de carbono en reciclado térmico. Para el proceso de pirólisis, la relación es del 17 al 67 % para la fibra de vidrio y del 80 al 96 % para la fibra de carbono (Shyha y Huo, 2021).

Tabla 2. Comparación de resistencia mecánica de la fibra después del proceso de reciclado.

Región	Relación de la resistencia a la tracción de fibra reciclada en comparación con fibra virgen.
Químico	0.47-0.99
Electroquímico	0.80
Lecho fluido	0.54-0.74
Fragmentación por pulsos de alto voltaje	0.88
Mecánico	0.80-0.82
Pirólisis por microondas	0.79
Pirólisis	0.17-0.96

Por su parte, Martínez, et al., (2022) realizaron un estudio del estado del arte de las principales estrategias para tratar los residuos de las palas de turbinas eólicas fabricadas con

materiales compuestos. Dentro de su análisis realizó un resumen de las ventajas y desventajas de los principales métodos de reciclaje los cuales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los distintos métodos de reciclaje.

Método de reciclaje	Ventajas	Desventajas
Reciclaje Mecánico	<ul style="list-style-type: none"> Escala industrial Bajo costo de operación Costo de inversión media Bajo consumo de energía No utiliza 	<ul style="list-style-type: none"> Las propiedades mecánicas de la fibra se degradan Se recuperan pequeñas piezas de fibra
Pirólisis	<ul style="list-style-type: none"> Escala industrial Costo de operación medio Costo de inversión bajo Se mantiene las propiedades mecánicas de la fibra No se utilizan solventes químicos Recuperación de energía 	<ul style="list-style-type: none"> Alto consumo energético Liberación de gases peligrosos Fibras contaminadas con carbón y cambios en la estructura química Dificultad para controlar el proceso

Método de reciclaje	Ventajas	Desventajas
Lecho Fluido	Recuperación de fibras limpias Alta tolerancia a la contaminación del material	Escala de laboratorio No se recupera la resina
Pirolisis por microondas	Recuperación de energía Consumo de energía medio Proceso más fácil de controlar que la pirolisis	Escala de laboratorio Costo de inversión elevado
Solvólisis	Consumo de energía medio Calidad muy alta de las fibras obteniendo buenas propiedades mecánicas Recuperación limpia de fibras Método muy ecológico	Escala de laboratorio Costo de operación alto Costo de inversión alto Baja tolerancia a la contaminación del material Alto impacto ambiental por los residuos de los solventes que se utilizan
Fragmentación por pulsos de alto voltaje	Alto potencial para la escala industrial Mantiene muy bien las propiedades mecánicas de la fibra	Escala de laboratorio Se recuperan pequeños pedazos de fibra Alta disminución de módulos de fibra de vidrio

A partir del análisis de los métodos de reciclaje de aspas de aerogeneradores y considerando sus ventajas y desventajas, se pueden sugerir varias estrategias sostenibles que fomenten una gestión adecuada de estos residuos; como por ejemplo la implementación de un sistema de reciclaje integrado que combine el reciclaje mecánico para la recuperación inicial y la pirolisis para la recuperación de la energía, esto permitiría aprovechar las ventajas de cada método y mitigar sus desventajas.

De igual forma, se pueden promover políticas que incentiven la reutilización y el reciclaje que provienen de las aspas, alineándose así al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 12 sobre producción y consumo sostenibles. De igual forma, implementar programas educativos en las comunidades

sobre la importancia y gestión adecuada de los residuos. También, se deben establecer alianzas con empresas que se especialicen en tecnologías avanzadas de reciclaje como la solvolisis o la fragmentación por pulsos de alto voltaje, que garantiza un manejo adecuado y eficientes de los desechos generados por las aspas. Otra estrategia puede ser el ofrecer incentivos fiscales o subsidios a las empresas que implementen prácticas sostenibles o del manejo de residuos.

CONCLUSIÓN

El estudio sobre el análisis de los métodos de reciclaje de las aspas de aerogeneradores en México ha traído consigo importantes conclusiones que destacan tanto los desafíos como las oportunidades en este campo. A medida que la energía eólica crece como una

fuerza clave de energía renovable, la gestión adecuada de los residuos generados por las palas que, al final de su vida útil se convierte en un aspecto verdaderamente crítico para asegurar la sostenibilidad del sector.

Una vez realizada la revisión del estado del arte de los principales métodos de reciclaje para materiales compuestos se concluyó que los métodos térmicos tienen un gran impacto ambiental por las emisiones generadas en sus procesos, por su alto gasto energético y se encuentra en un nivel de TRL mayor a 7. Por otra parte, el reciclaje químico tiene buen potencial de desarrollo y que se encuentran en niveles de TRL inferiores al 5 con gran potencial de desarrollo ya que están en prueba a nivel laboratorio y se necesita una especialización en materia de química para realizar los procesos de separación de componentes.

Sin embargo, por los costos competitivos es necesario explorar los métodos físicos de los cuales son: trituración mecánica, para favorecer el transporte a bajo costo y su manejo en sitios especializados cercanos al centro de uso de los productos de fibra de vidrio. Los dos primeros métodos tienen un nivel de maduración tecnológica mayor a 9 el cual nos dice que ya tiene un desarrollo tecnológico alto y que actualmente la tecnología se encuentra en el mercado. Por otro lado, la fragmentación por pulsos de alto voltaje se encuentra en un nivel de maduración tecnológica de 5 y en comparativa con los otros dos métodos mecánicos las propiedades de la fibra recuperada se ven mermadas considerablemente. En cambio,

si se recupera por medio de fragmentación por pulsos de alto voltaje esta fibra comparada con la fibra virgen mantiene un 88% de sus propiedades como se menciona en la tabla 3. Con esto se podría evaluar si esta fibra se podría reutilizar para aplicaciones eólicas de baja escala donde se necesitan materiales con buenas propiedades estructurales.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE). (2022). "El potencial eólico mexicano". <https://amdee.org/Publicaciones/AMDEE-PwC-El-potencial-eolico-mexicano.pdf>
- Asociación Empresarial Eólica AEE. (2021). "Economía circular en el sector eólico palas de aerogeneradores". https://aeeolica.org/wp-content/uploads/2021/12/AEE-2021-Economia-Circular-en-el-sector-eolico_Palade-los-Aerogeneradores.pdf
- Fernández, S. (2022). "Residuos de compósitos". <https://elperiodicodelaenergia.com/reciclaje-de-palas-uno-de-los-grandes-retos-a-los-que-se-enfrenta-el-sector-eolico/>
- Jiménez D., y Valdes K. (2022). "Planificación para la reutilización y reciclaje de las palas de aerogeneradores de fibra de vidrio y carbono", Periodicidad: Semestral. 18 (2).
- Martinez-Marquez D., Florin N., Hall W., Majewski P., Wang H., y Stewart R. A. (2022). "State-of-the-art review of product stewardship strategies for large composite wind turbine blades", Resources, Conservation and Recycling Advances. 15 (1). <https://10.1016/j.rcradv.2022.200109>.
- Nagle A. J., Delaney E. L., Bank L. C., y Leahy P. G. (2020). "A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of

- waste from decommissioned Irish wind turbine blades”, *J Clean Prod.* 277(1). <https://10.1016/j.jclepro.2020.123321>
- Oliveux G., Dandy L. O., y Leeke G. A. (2015). “Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties”. 72 (1): 61-99. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>
- Paulsen E. B., y Enevoldsen P. (2021). “A multidisciplinary review of recycling methods for end-of-life wind turbine blades”, *Energies (Basel)*. 14(14): 4247. <https://doi.org/10.3390/en14144247>
- Qureshi J. A. (2022). Review of Recycling Methods for Fibre Reinforced Polymer Composites”. 14(24), 16855; <https://doi.org/10.3390/su142416855>
- Robbertsen, W. (2021). Reciclaje Eólico. *Induambiente*. Recuperado de <https://www.induambiente.com/especial/energia/reciclaje-eolico>
- Shyha I. y Huo D. (2021). “Engineering Materials Advances in Machining of Composite Materials Conventional and Non-conventional Processes”, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71438-3>
- Vergara-Quezada, A., Pozos-Texon, F. J., Pinilla-Rodríguez, J. A., Gasca-Caballero, C. J., y Reyes-Olán, C. (2020). Exploración de tecnologías para el reciclaje de palas de aerogeneradores. *Ingeniantes*, 11(1), 2-44. https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes11no1vol2/Final%20ingeniantes%201112%20CIME_%20Exploracion%20de%20tecnologias%20para%20el%20reciclaje%20de%20palas.pdf
- Vestas, “VESTASV27-225 kW, 50Hz WINDTURBINE”, 2003.