



Planificación para la reutilización y reciclaje de las palas de aerogeneradores de fibra de vidrio y carbono

Planification for the reutilization and recycling of the wind turbines fiberglass and carbon fiber blades

Diana Jiménez¹ , Katherine Valdes¹ , Roxana González¹ , Pablo Montero-Prado¹ 

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Jornada de Iniciación Científica, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Centro Regional de Chiriquí, Panamá

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica, Panamá

diana.jimenez@utp.ac.pa, katherine.valdes@utp.ac.pa, roxana.gonzalez1@utp.ac.pa, pablo.montero@utp.ac.pa

Fecha de recepción: 6 de octubre de 2022; Fecha de aprobación: 4 de noviembre de 2022.

***Autor de correspondencia:** Pablo Montero-Prado (pablo.montero@utp.ac.pa)

RESUMEN. Frente a la problemática de abastecimiento energético que presenta Panamá es de gran importancia mejorar la eficiencia energética. Apuntando a tecnologías más limpias y sostenibles, como la iniciativa de energía eólica que se refiere a la obtención de energía cinética del viento, la cual busca mejorar la eficiencia de la producción de energía y reducir el estrés hídrico. Actualmente, Panamá está comprometido cada vez más con la diversificación del sector energético, mediante la implementación de la generación eólica, lo que nos lleva a un desafío en la gestión de desechos una vez cumplan su vida útil, especialmente las aspas o palas. Dichas aspas están compuestas de materiales extremadamente difíciles de reciclar, por lo que la reutilización de las palas de los aerogeneradores es la solución fundamental propuesta a continuación, principalmente por su coste y accesibilidad. En este documento, se presentan algunas opciones para resolver esta problemática de gestión de residuos de la industria eólica al finalizar su ciclo de vida útil. Considerando algunas alternativas de reutilización y reciclaje para otorgar a las aspas fines arquitectónicos en forma de proyecciones a futuro de marquesinas para bicicletas, parques recreativos, parada de autobuses, y aplicaciones de otros procesos como el pirólisis para tratar las palas, modificando así las características de los residuos.

Palabras clave. *Aerogeneradores, energía eólica, fibra de carbono, fibra de vidrio, palas, parques eólicos, reciclaje, residuos sólidos, vida útil.*

ABSTRACT. Faced with the problem of energy supply that the country presents, it is of great importance to improve energy efficiency. Aiming at cleaner and more sustainable technologies, such as the wind energy initiative that refers to obtaining kinetic energy from the wind, which seeks to improve the efficiency of energy production and reduce water stress. Currently, Panama is increasingly committed to the diversification of the energy sector, through the implementation of wind generation, which leads us to a challenge in the management of waste once they reach their useful life, especially blades. These blades are made of materials that are extremely difficult to recycle, so the reuse of wind turbine blades is the fundamental solution proposed below, mainly due to their cost and accessibility. In this document, some options are presented to solve this problem of waste management in the wind industry at the end of its useful life cycle. Considering some reuse and recycling alternatives to give the blades architectural purposes in the form of future projections of bicycle shelters, recreational parks, bus stops, and applications of other processes such as pyrolysis to treat the blades, thus modifying the characteristics of the waste.

Keywords. *Wind turbines, wind energy, fiberglass, carbon fiber, blades, wind farms, solid waste, recycling, lifetime.*

1. Introducción

Cada vez más, el mundo está avanzando en términos de garantizar seguridad del suministro energético para todas las actividades humanas como el procesamiento de alimentos, fabricación, transporte, etc. Todas estas condiciones aportan condiciones que buscan suplir

numerosas necesidades, como la comodidad y el bienestar humano; el crecimiento económico y la prosperidad; desarrollo tecnológico, industrial y la sostenibilidad [1]. Este alto nivel de dependencia en la generación y disponibilidad de energía ha creado la necesidad de visualizar e impulsar nuevas formas de

producción energética a través de nuevas tecnologías, capaces de suministrar energías limpias, renovables y sostenibles [2].

En este sentido, entre las nuevas tendencias estudiadas, resaltan, la utilización de diversas fuentes como la energía geotérmica, oceánica, solar y la eólica [3]. Estos sistemas de generación buscan mejorar la eficiencia de la producción de energía, reduciendo o eliminando las afectaciones vinculadas a esta actividad como el estrés hídrico, causado por las plantas de generación de combustibles fósiles, de acuerdo con el alto consumo de agua dulce que requieren. Además de minimizar el impacto ambiental causado por la instalación de plantas de generación hidroeléctricas [4-7].

En los últimos años, el uso de la energía eólica ha mostrado un considerable crecimiento, siendo esta una fuente notable y continua de energía renovable. Esta fuente de energía tiene como fuente fundamental, las corrientes de viento, disponible en todo el mundo [8]. Es necesario señalar que los vientos son generados por los gradientes de temperatura ocasionados por el sol. Dicho esto, la energía eólica se origina por la influencia de la energía solar [9]. Se ha estimado que la capacidad de generación del viento disponible a nivel mundial oscila entre 300 y 870 tera watts (TW) [10], [11]. Esto representaría una cantidad mínima, cuatro veces superior a la demanda energética mundial. Convirtiéndola en una de las mayores fuentes potenciales de energía disponible [3].

Existe una gran disponibilidad de energía eólica disponible, por lo que se han desarrollado nuevos aerogeneradores de mayor eficiencia, logrando disminuir considerablemente el costo de generación de electricidad de fuente eólica, igualándola con las fuentes de energía tradicionalmente utilizadas [9].

Normalmente, estos aerogeneradores están formados por un conjunto de tres aspas o paletas, capaces de transformar la energía cinética del viento convirtiéndola en energía mecánica, y por medio de engranajes transmiten el movimiento a un dispositivo generador, produciendo así, energía eléctrica, que puede ser suministrada a la red pública, o pueden funcionar de manera aislada [3]. Toda esta maquinaria (turbina de viento) se coloca en la cima de un mástil o torre donde hay más influencia del viento. La longitud de las aspas

definirá el diámetro del área de barrido de estas y, cuanto mayor sea esta área, mayor será la potencia que puede producir un aerogenerador [12].

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 [8], [13-16]. En este sentido, es necesario considerar que un importante número de parques eólicos están por ser desmantelados. Generando la necesidad de evaluar el uso y manejo adecuado de los materiales y partes generados a fin de satisfacer el concepto de que la tecnología es realmente amigable con el medio ambiente. Como consecuencia, en los últimos años, el manejo de residuos provenientes de la industria de energías renovables, principalmente de fuente eólica, ha ganado importancia, convirtiéndose en foco de interés debido a las implicaciones medioambientales que conlleva [14].

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 [8], [13], [17-19]. 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 [20]. De forma general, la mayor parte de los elementos que componen las turbinas eólicas (bases, torres, transmisión y generadores) son altamente reciclables. No obstante, las palas o aspas representan mayor complicación, debido a los diferentes materiales utilizados y la composición de estos [13], [17].

En 2020, la revista virtual Bloomberg publicó impactantes y preocupantes imágenes de 870 palas de aerogeneradores esperando ser enterradas en el vertedero municipal de Casper, Wyoming (Ver Figura 1), el componente más problemático de dicho artefacto. «Los fragmentos cortados parecen huesos de ballena blanqueados acurrucados unos contra otros [21].



Figura 1. Palas de aerogeneradores apiladas en el vertedero regional de Wyoming.
Fuente: Bloomberg Green.

El desafío se centra en el reciclaje de las palas. Peter Meinlschmidt, director del Instituto Fraunhofer de Investigación de la Madera en Brunswick, establece que

las palas están fabricadas de materiales compuestos: fibra de vidrio o fibra de carbono, madera de balsa, resina epoxi y poliéster [22]. Estos materiales son extremadamente difíciles de reciclar y caros de separar, debido a su extensa longitud, teniendo que ser transportadas individualmente, lo que implica costos elevados para grandes distancias. «En la Unión Europea, que regula estrictamente el material que puede ir a los vertederos, algunas palas se queman en hornos que producen cemento o en centrales eléctricas. No obstante, su contenido de energía es débil y desigual y la fibra de vidrio que se quema emite contaminantes» [21]. En España, por ejemplo, la empresa Reciclaia estima que hasta el 2014 alrededor de 20.000 palas fueron sustituidas [23]. Un 10% de ellas han sido recicladas mediante destrucción por trituración, mientras que el resto se encuentran en más de 100 cementerios repartidos a lo largo de la nación. Para evidenciar la magnitud de contaminación a la que se enfrenta, la pala de la turbina Haliade-X 12 MW es más larga que el ala de un Boeing 747 (71 metros) y su cuerpo unos metros más pequeños que la Torre Eiffel (ver Figura 2).

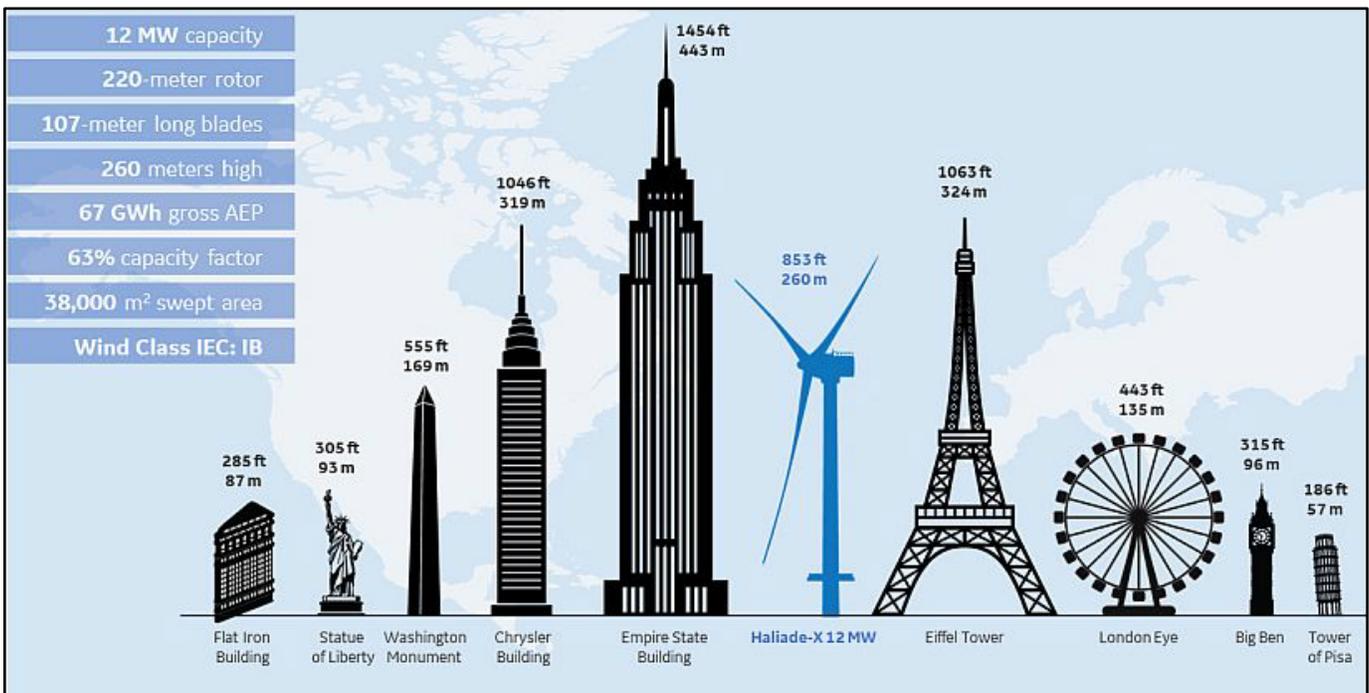


Figura 2. Comparación de la Haliade-X 12 con edificaciones representativas.
Fuente: Energy Global News.

Actualmente, Panamá se encuentra en franca diversificación del sector energético implementando generación eólica. Como se puede observar en la tabla 1, existen múltiples consideraciones para la instalación presente y futura de parques de generación de energía de fuente eólica. Actualmente con una capacidad instalada de 270MW, 66MW en fase de construcción y seis (6) proyectos adicionales con licencias definitivas, en proceso de diseño [24].

Tabla 1. Proyectos Eólicos Considerados. Fuente: ETESA - mayo 2017.

Nombre	Capacidad Instalada (MW)	Energía Promedio Anual (GWh)	Costo Fijo O&M (B\$/kW-Año)	Valor de Inversión (P. Bruta) (B./kW)	Vida Útil (Años)
Penonomé III	69.00	203.30	130.43	1594.20	25.00
Toabré Etapa 1	102.00	318.20	40.00	2450.00	30.00
Eólico Zona Coclé 01	123.00	383.71	40.00	2450.00	30.00
Eólico Zona Coclé 02	105.00	294.34	40.00	2450.00	30.00
Eólico Zona Coclé 03	74.00	207.44	40.00	1500.00	20.00
Eólico Zona Panamá 01	32.00	89.70	40.00	1600.00	20.00
Eólico Zona Panamá 02	136.00	381.24	40.00	1500.00	20.00
Eólico Zona Veraguas 01	104.40	257.19	70.00	2000.00	25.00
Eólico Zona Chiriquí 01	19.80	63.77	60.61	3030.30	25.00
Eólico Zona Veraguas 02	111.60	368.63	70.00	2000.00	25.00
Eólico Zona Veraguas 03	115.20	235.20	70.00	2000.00	25.00
Eólico Zona Coclé 04	80.00	309.00	25.00	2000.00	30.00
Eólico Zona Chiriquí 02	25.00	48.73	14.58	2000.00	20.00
Totales	1097.00	3160.44			

Todos estos datos hacen referencia a la creciente inversión de generación eólica en el país y, a su vez, un desafío que supone obtener la mayor utilidad de estas grandes obras ingenieriles, antes, durante y después de su instalación

Por lo antes descrito, se plantea la realización de una revisión y evaluación de las tendencias a nivel mundial, que permitan proponer diferentes opciones para el uso de estas una vez cumplan su vida útil en las instalaciones en Panamá. Por lo que este documento tiene como objetivo, plantear diferentes opciones de solución a la futura problemática que existen para una adecuada forma de reutilizar y reciclar las palas de los aerogeneradores y la forma en que se pueden aplicar en la industria eólica en Panamá.

A continuación, se justificarán y detallarán proyectos para el aprovechamiento de las palas mediante medidas e ideas alternativas al ámbito de la energía eólica.

2. Materiales y métodos

La investigación llevada a cabo pertenece a la categoría de Ingeniería y Ciencias Sociales, siendo el área de estudio el sector energético.

Se abarcaron aquellos países que poseen parques eólicos y donde se han implementado medidas para la reutilización y reciclaje de las palas de aerogeneradores. Por ejemplo, Estados Unidos y España. De igual forma, se tomó en cuenta parte del territorio nacional, enfocándose en el distrito de Penonomé y Ciudad de Panamá.

Los materiales empleados para la elaboración del proyecto incluyen informes y artículos científicos, sociales, ambientales e institucionales sobre los aerogeneradores en el ámbito internacional. Además, periódicos y revistas virtuales. Dichos materiales debían presentar una antigüedad de máximo 11 años y mencionar fuentes para comprobar su fiabilidad.

Se recolectaron tanto datos cualitativos como cuantitativos. De hecho, se aplicaron diversos métodos/técnicas para la recopilación de la información, tales como: lluvia de ideas, revisión de registros, inferencia y métodos analíticos.

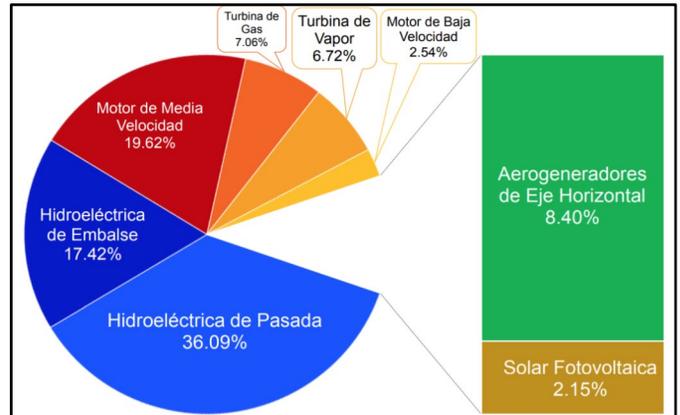
3. Resultados y discusión

Es de vasto conocimiento que, al finalizar la vida útil de las palas de los aerogeneradores, estas se convierten en un desecho sólido. Debido a la estructura perdurable e indeformable, no existe un plan efectivo de reutilización para construir otros aerogeneradores; de hecho, son difícilmente degradables sin procesos específicos. Tomás Romagosa, director técnico de AEE, expresa que «desde el sector existe el consenso de buscar soluciones alternativas al uso de vertederos, aunque las palas son inocuas para el medio ambiente» [25].

En consecuencia, al auge que se ha visto en los últimos años en el sector de las energías renovables, la energía eólica ha dado frutos en la República de Panamá (Ver Gráfica 1 y Tabla 2). Sin embargo, el parque eólico de Penonomé en unos años alcanzará el fin de su vida útil, por lo que se deben tomar medidas para evitar una contaminación por desechos sólidos que agrave la situación ambiental.

Tabla 2. Licencias Definitivas para Generación Eólica. Fuente: Autoridad Nacional de los Servicios Públicos - mayo 2017.

Empresa	Proyecto	Provincia	MW	Estatus
Parque Eólico Toabré, S.A.	Toabre	Coclé	225	Diseño final
Parque Eólico Toabré, S.A.	Antón	Coclé	105	Diseño final
UEP Penonomé II, S.A.	Portobelo	Coclé	47.5	En construcción
UEP Penonomé II, S.A.	Nuevo Chagres	Coclé	115	En construcción
Helium Energy Panamá, S.A.	Viento Sur	Veraguas	150	Diseño final
Helium Energy Panamá, S.A.	Escudero	Veraguas	116	Diseño final
			758.50	



Gráfica 1. Composición Porcentual por Tecnología del Sistema de Generación. Fuente: Información de Agentes Panamá - mayo 2017.

Se han contemplado posibles soluciones económicamente viables como la reutilización de las palas para construir parques recreativos y paradas de buses/bicicletas en puntos estratégicos a lo largo de la capital del país y en zonas aledañas al distrito de Penonomé. De igual forma, se contempla la implementación de nuevas técnicas de reciclaje mecánico de este material tan complejo.

En cuanto a la construcción de parques recreativos, el proceso consistirá en el corte de las palas en pedazos más pequeños a través de un método de desmontaje de las palas del rotor con una lanza de chorro de agua. «El enfoque convencional es usar una sierra de cinta para cortar las palas del rotor en tercios o cuartos, pero este es un proceso relativamente complejo. Debido a esto, se planteó la idea de probarlo con una lanza de chorro de agua. Lo cual fue mucho más rápido y con mejor resultado», argumentó Peter Meinschmidt en una entrevista, [22].

En 2007, el municipio de Rotterdam inauguró un parque infantil para Kinderparadijs Meidoorn [26] construido con palas de rotor que originalmente estaban destinadas a vertederos. Como se observa en la Figura 3, varias palas se cortaron para crear diseños interactivos que se acogieran a las necesidades de un parque; por ejemplo, túneles, torres, puentes, colinas, rampas y toboganes.



Figura 3. Parque recreativo diseñado a partir de las palas de los aerogeneradores.
Fuente: Energy Global News.

Otra idea innovadora se encuentra localizada en la plaza de Willemsplein, donde se colocaron las palas en varios ángulos y se pintaron de colores llamativos para crear asientos públicos ergonómicos con diversidad de opciones de sitios (Ver Figura 4). Del mismo modo, en 2014, se creó una marquesina de autobús duradera en la ciudad de Almere, nuevamente a partir de palas de turbina cuya vida útil había finalizado [26].



Figura 4. Asientos públicos diseñados a partir de las palas de los aerogeneradores.
Fuente: Energy Global News.

Una vez establecido el panorama internacional, es momento de enfocarse en cómo se llevaría a cabo esta labor en el territorio panameño. El Parque Eólico Laudato Si' ubicado en Penonomé, provincia de Coclé, fue inaugurado el 13 de abril de 2016 [27]. Por lo tanto,

el fin del período de vida útil de estas palas se aproxima eminentemente en unos cuantos años, convirtiéndose en un gran problema de desechos sólidos costosos si no se manejan de la forma adecuada.

La reutilización de las palas de los aerogeneradores es la solución fundamental propuesta, principalmente por su coste y accesibilidad. La capital de Panamá posee diversos lugares turísticos y las zonas adyacentes al distrito de Penonomé que son espaciosas, sitios ideales para instaurar los parques propuestos y perfectamente adaptados para que los nacionales y turistas disfruten de una gran experiencia e incentivar la reutilización de estas. Entre los lugares turísticos se proponen la cinta Costera, el Causeway ubicado en la Calzada de Amador, Costa del Este, Ciudad del Saber, Parque Urracá y Bella Vista. Como se puede ver en la Figura 5, se realizó una proyección a futuro de esta idea implementada en la Cinta Costera. Cabe destacar, que estas zonas son propuestas para empezar la iniciativa y generar un impulso para continuar expandiéndose por el resto del territorio nacional.

Adicionalmente, es posible considerar la posibilidad de construir asientos públicos hechos a partir de partes de palas. Dichos asientos se pueden asentar en los campus universitarios, centros comerciales con grandes espacios, canchas de fútbol, béisbol, jardines de museos y galerías de arte e incluso en los parques recreativos.



Figura 5. Proyección a futuro de un parque recreativo ubicado en la cinta Costera. Creado por nuestra Investigadora Diana Jiménez mediante Photoshop.

Para una mejor visualización de las ideas propuestas se han creado proyecciones de como lucirían en distintas localidades de la región, como se observa en la Figura 6.



Figura 6. Parque recreativo diseñado a partir de las palas de los aerogeneradores.
Fuente: Energy Global News.

Un proyecto por destacar es el de Brian D. Rasmussen en Aalborg, Dinamarca. En la figura 7 podemos observar un estacionamiento techado para bicicletas, utilizando una pala de turbina eólica [28]. Esta idea se puede implementar fácilmente en algunos de lugares anteriormente mencionados en el Istmo panameño.



Figura 7. Refugio para bicicletas diseñado a partir de las palas de los aerogeneradores.
Fuente: Suisse Éole.

En la Figura 8 se puede observar una visualización de una posible marquesina de bicicletas en la Cinta Costera (Ver Figura 8).



Figura 8. Proyección a futuro de una marquesina de bicicletas ubicada en la Cinta Costera. Creado por nuestra Investigadora Diana Jiménez mediante Photoshop.

Los autobuses son sin duda la mejor y más económica forma de viajar por todo Panamá [29]. Por consiguiente, es crucial tener paradas de autobuses en buen estado que cumplan con los requisitos necesarios para que las personas estén cómodas durante la espera del servicio público. A partir de esta idea, se concibió la forma de reutilizar las palas construyendo innovadoras paradas en puntos focales a lo largo de las rutas hacia todos los destinos dentro de la capital. Por ejemplo, para el servicio de Metro Bus se pueden colocar kioscos identificados donde recargar las tarjetas y, de esta forma, se evita el transbordo hacia la terminal de Albrook, la de mayor auge. Para visualizar mejor este proyecto, se ha creado una proyección de cómo se vería una posible parada en la Ciudad del Saber (Ver Figura 9).



Figura 9. Proyección a de una futura parada de autobuses en Ciudad del Saber, Panamá. Creado por nuestra Investigadora Diana Jiménez mediante Photoshop.

Con la implementación a futuro de todas estas propuestas de reutilización, es innegable la posibilidad de visualizar el reciclaje de este material, a pesar de los materiales compuestos de los que está hecho. Las iniciativas de reciclaje aportan un toque creativo al reciclaje de palas de aerogeneradores y generan nuevas oportunidades de negocio y puestos de trabajo. Los puestos de trabajo corresponden no solo a profesionales de la ingeniería, sino también a artistas. Además, representan una alternativa útil, original y de bajo costo para los procesos de reciclaje ya implantados e incrementarán en un futuro próximo la recuperación de los residuos compuestos.

Como el objetivo es recuperar las materias primas para utilizarlas en otra aplicación, debe destacarse el reciclaje mecánico. Este consiste en triturar o separar el material para su posterior reutilización en la fabricación de otros materiales fibrosos o como material relleno [30].

Para llevar a cabo esta propuesta, se sugiere la adopción de la tecnología creada por el Instituto Fraunhofer de Tecnología Química ICT de Alemania [22]. Dicha nueva tecnología alemana consiste en cortar las palas de rotor en tercios o cuartos con ayuda de una lanza de chorro de agua y, posteriormente, se utiliza un triturador móvil para fragmentar las piezas en pedazos del tamaño de la palma de una mano.

Estos pedazos triturados se deben separar en componentes individuales para poder reciclarlos, proceso que se lleva a cabo a través de un molino de impacto separando el material compuesto, ya que la madera es viscoelástica; sin embargo, las fibras de vidrio

y la resina son muy duras [31].

Se conoce que una pala de rotor contiene alrededor de 15 metros cúbicos de madera de balsa, que es extremadamente resistente a la presión. «Esa es la ventaja clave de la balsa sobre la mayoría de las espumas plásticas», explica Meinschmidt [22]. Estas piezas se transforman, posteriormente, en esteras aislantes de fibra de madera ultraligeras. Igualmente, producen una nueva espuma de madera elástica, la cual se crea moliendo el material y mezclándolo con un agente espumante. La espuma puede utilizarse como material aislante ecológico y como material de embalaje desechable en el contenedor de reciclaje de papel.

No sólo en Alemania se ha implementado esta nueva tecnología. En Washington, Estados Unidos, el director ejecutivo de Global Fiberglass Solutions, Don Lilly, ha transformado compuestos de fibra de vidrio en pequeñas bolitas que él llama EcoPoly [32] (Ver Figura 10). Estas bolitas tan peculiares, se convierten en plásticos inyectables, o tableros altamente impermeables que se pueden utilizar en la construcción.



Figura 10. Bolitas de fibra de vidrio llamadas EcoPoly. Fuente: RD Energía

Un método conocido como pirólisis es otra vía para tratar las palas una vez que se convierten en residuos. El proceso consiste en cortar las palas y calentarlas en hornos de hasta 450°C a 700°C, rompiendo las fibras compuestas. Dichas fibras pueden ser aprovechadas por otras industrias para fabricar pegamentos, pinturas y concreto.

Es imprescindible resaltar que las soluciones de reutilización y reciclaje propuestas pueden modificarse en cuanto a la ubicación y la metodología para adaptarse a las necesidades que se quieran en el momento de su

implementación. Dichos cambios deben realizarse en base a datos respaldados por estudios/proyectos de viabilidad certeros.

4. Conclusiones

La problemática de la disposición de palas de los aerogeneradores al finalizar su vida útil representa un impacto negativo en el ámbito ecológico. Esto hace que el concepto de tecnología verde de la energía eólica difiera de como la industria la cataloga y, por lo tanto, sus desechos sólidos no deben ser manejados a la ligera, sino tratados responsable y pertinentemente. No obstante, se debe reconocer que, a diferencia de otras fuentes de energía, la implementación de la energía eólica representa una alternativa de bajo impacto, alta efectividad y un mundo de ideas para aprovechar cada recurso que surja eventualmente al enfrentar el panorama en la gestión de desechos una vez desmantelados los equipos en los proyectos de generación eólica en Panamá.

En consecuencia, deben implementarse medidas eficaces que mitiguen los efectos de las palas de aerogeneradores en el medio ambiente, tales como las soluciones propuestas de reutilización y reciclaje. Dichas soluciones brindan la posibilidad de aportar una segunda utilidad en las calles de Panamá.

Se desea que en el futuro no sólo se implementen estas medidas en la capital y en lugares adyacentes al distrito de Penonomé, sino extenderlas por todo el territorio nacional para aprovechar al máximo esta iniciativa. No obstante, para lograrlo, Panamá deberá someterse a un arduo desarrollo y expansión hacia técnicas sostenibles, tal como han hecho los demás países que han implementado estos proyectos.

Estas iniciativas presentan un enfoque óptimo para el futuro del país, fomentando una cultura de reciclaje y ambientalista en las empresas que desean realizar proyectos innovadores, conservando los recursos del planeta Tierra a mediano y largo plazo. De esta forma, se desarrollará una energía sostenible de forma integral y lo más limpia posible después del fin de vida útil de los materiales.

AGRADECIMIENTOS

Extendemos nuestro agradecimiento a las diversas instituciones, empresas, editoriales y autores que llevaron a cabo las investigaciones pertinentes para la

redacción de los artículos, periódicos, revistas e informes. Así mismo, a los programadores y creadores de los sitios webs empleados. Queremos agradecer también a los profesores del Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica de la Universidad Tecnológica de Panamá. Igualmente, se extiende la gratitud a los organizadores de la Jornada de Iniciación Científica (JIC), en cuyo marco se realizó este trabajo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

A continuación, se especifica la contribución de cada autor: Investigación, D.J., R.V., K.V., P.M.; Conceptualización, D.J., R.V., K.V.; Elaboración y corrección del artículo, D.J., R.V., K.V., P.M.; Supervisión, P.M.

Todos los autores afirman que la versión final de este artículo fue leída y aprobada.

REFERENCIAS

- [1] A. Dehghani-Sanij y M. N. Bahadori, «Chapter 1 - Energy consumption and environmental consequences», en *Ice-Houses*, A. Dehghani-Sanij y M. N. Bahadori, Eds. Academic Press, 2021, pp. 1-55. doi: 10.1016/B978-0-12-822275-1.00012-6.
- [2] O. C. Onar y A. Khaligh, «Chapter 2 - Energy Sources», en *Alternative Energy in Power Electronics*, M. H. Rashid, Ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 81-154. doi: 10.1016/B978-0-12-416714-8.00002-0.
- [3] A. Khaligh y O. C. Onar, «45 - Energy Sources», en *Power Electronics Handbook (Third Edition)*, M. H. Rashid, Ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2011, pp. 1289-1330. doi: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00045-8.
- [4] S. Nair y W. Timms, «Freshwater footprint of fossil fuel production and thermal electricity generation and water stresses across the National Electricity Market (NEM) region of Australia», *Journal of Cleaner Production*, vol. 267, p. 122085, sep. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122085.
- [5] A. Tarhule, «Part 4 - The Future of Water: Prospects and Challenges for Water Management in the 21st Century», en *Competition for Water Resources*, J. R. Ziolkowska y J. M. Peterson, Eds. Elsevier, 2017, pp. 442-454. doi: 10.1016/B978-0-12-803237-4.00025-2.
- [6] M. E. Webber, «Chapter 2.2.6 - Water for Electricity Generation in the United States», en *Competition for Water Resources*, J. R. Ziolkowska y J. M. Peterson, Eds. Elsevier,

- 2017, pp. 212-232. doi: 10.1016/B978-0-12-803237-4.00012-4.
- [7] L. Yu y İ. Yıldız, «1.24 Energy and Water Pollution», en *Comprehensive Energy Systems*, I. Dincer, Ed. Oxford: Elsevier, 2018, pp. 950-979. doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00128-0.
- [8] P. Liu, F. Meng, y C. Y. Barlow, «Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison», *Journal of Cleaner Production*, vol. 212, pp. 1268-1281, mar. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.043.
- [9] I. Dincer y Y. Bicer, «Chapter 6 - Integration of renewable energy systems for multigeneration», en *Integrated Energy Systems for Multigeneration*, I. Dincer y Y. Bicer, Eds. Elsevier, 2020, pp. 287-402. doi: 10.1016/B978-0-12-809943-8.00006-6.
- [10] J. W. Tester, E. M. Drake, M. J. Driscoll, M. W. Golay, y W. A. Peters, *Sustainable Energy*, 2.^a ed. The MIT Press, 2012. Accedido: 21 de julio de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/j.ctt5hbbwk>
- [11] W. A. Hermann, «Quantifying global exergy resources», *Energy*, vol. 31, n.º 12, pp. 1685-1702, sep. 2006, doi: 10.1016/j.energy.2005.09.006.
- [12] Soli clima, «Introducción a la energía eólica», 2005. [//news.soliclima.com/divulgacion/energia-eolica/introduccion-a-la-energia-eolica](http://news.soliclima.com/divulgacion/energia-eolica/introduccion-a-la-energia-eolica) (accedido 16 de julio de 2021).
- [13] J. P. Jensen y K. Skelton, «Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 97, pp. 165-176, dic. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.041.
- [14] N. Tazi, J. Kim, Y. Bouzidi, E. Chatelet, y G. Liu, «Waste and material flow analysis in the end-of-life wind energy system», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 145, pp. 199-207, jun. 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.02.039.
- [15] P. Deeney *et al.*, «End-of-Life alternatives for wind turbine blades: Sustainability Indices based on the UN sustainable development goals», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 171, p. 105642, ago. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105642.
- [16] A. Cooperman, A. Eberle, y E. Lantz, «Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 168, p. 105439, May 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105439.
- [17] J. Joustra, B. Flipsen, y R. Balkenende, «Structural reuse of wind turbine blades through segmentation», *Composites Part C: Open Access*, vol. 5, p. 100137, jul. 2021, doi: 10.1016/j.jcomc.2021.100137.
- [18] A. J. Nagle, E. L. Delaney, L. C. Bank, y P. G. Leahy, «A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades», *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, p. 123321, dic. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123321.
- [19] C. Alvarez, «Lo que contamina un aerogenerador - Ecolaboratorio», *El País*, 2010. <https://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/09/lo-que-contamina-un-aerogenerador.html> (accedido 16 de julio de 2021).
- [20] M. Rani, P. Choudhary, V. Krishnan, y S. Zafar, «A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades», *Composites Part B: Engineering*, vol. 215, p. 108768, jun. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108768.
- [21] C. Martín, «Wind Turbine Blades Can't Be Recycled, So They're Piling Up in Landfills», *Bloomberg.com*, 5 de febrero de 2020. Accedido: 24 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills>
- [22] Residuos Profesional, «Desarrollan un sistema para reciclar las palas de los aerogeneradores», *Residuos profesional*, 2020. <https://www.residuosprofesional.com/sistema-reciclar-palas-aerogeneradores/> (accedido 16 de julio de 2021).
- [23] A. Ruiz del Árbol, «Casi 20.000 palas de molinos de viento averiadas amenazan con un desastre ecológico», *ELDiario.es*, 21 de abril de 2014. https://www.eldiario.es/economia/aerogeneradores-obsoletas-cementerios-desastre-ecologico-gamesa-acciona_1_4925641.html (accedido 16 de julio de 2021).
- [24] N. Singh, «Panamá avanza en la ejecución de más de 700 MW de energías renovables - Energía Estratégica», *Energía Estratégica*, 2021. <https://www.energiaestrategica.com/panama-avanza-en-la-ejecucion-de-mas-de-700-mw-de-energias-renovables/> (accedido 16 de julio de 2021).
- [25] J. Lopez, «Puentes, parques o corales artificiales: así se reciclan las palas de los molinos eólicos», *elconfidencial.com*, 2021. Accedido: 30 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.elconfidencial.com/medioambiente/energia/2021-05-20/reciclan-las-palas-de-los-molinos-eolicos-bra_3088176/
- [26] K. Patowary, «The Second Life of Wind Turbine Blades | Amusing Planet», *www.amusingplanet.com*, 2017. <https://www.amusingplanet.com/2017/01/the-second-life-of-wind-turbine-blades.html> (accedido 20 de julio de 2021).
- [27] La Prensa, «Presidente Juan Carlos Varela inaugura parque eólico en Penonomé | La Prensa Panamá», 13 de abril de 2016. https://www.prensa.com/economia/Presidente-Juan-Carlos-Varela-Penonome_0_4459804147.html (accedido 20 de julio de 2021).
- [28] H. Eilers, «Vindmøllevinge får nyt liv på Aalborg Havn», *Energy Supply DK*. https://www.energy-supply.dk/article/view/699757/vindmollevinge_far_nyt_liv_pa_aalborg_havn (accedido 20 de julio de 2021).
- [29] EXPAT, «Transporte en Panamá, Transportes en Panamá», <https://www.expats.com/>. <https://www.expats.com/es/guia/america-central/panama/20081-transporte-en-panama.html> (accedido 20 de julio de 2021).
- [30] S. F. Munguía, «Miles de aerogeneradores se acercan al

- [31] final de su vida útil, la gran pregunta es qué haremos con sus palas después», *Xataka*, 15 de agosto de 2020. <https://www.xataka.com/energia/miles-aerogeneradores-se-acercan-al-final-su-vida-util-gran-pregunta-que-haremos-sus-palas-despues> (accedido 16 de julio de 2021).
- H. El Troudi, «Nueva técnica facilita reciclado de las palas de las turbinas eólicas», *Haiman El Troudi*, 17 de marzo de 2021. <https://haimaneltrouidi.com/nueva-tecnica-facilita-reciclado-de-las-palas-de-las-turbinas-eolicas/> (accedido 20 de julio de 2021).
- [32] Revista RD Energía, «¿Qué pasa con todas las turbinas eólicas antiguas?», *Bienvenido a Revista RD Energía*. <https://revistardenergia.com/que-pasa-con-todas-las-turbinas-eolicas-antiguas/> (accedido 20 de julio de 2021).