

1. Introducción

El reciclaje de las palas de aerogeneradores representa uno de los retos medioambientales más significativos para impulsar una transición energética más sostenible, y específicamente para el despliegue de la energía eólica. La acumulación de residuos generada por el fin de vida útil de estas estructuras plantea serias implicaciones ecológicas, por lo que la investigación y el desarrollo de materiales reciclables se posicionan como elementos clave para avanzar hacia una mayor sostenibilidad. En este sentido, es importante promover soluciones innovadoras que permitan cerrar el ciclo de vida de los componentes, minimizando así su impacto ambiental.

En este contexto, las resinas termoplásticas [1] han emergido como una alternativa prometedora frente a las resinas termoestables convencionales utilizadas históricamente en la fabricación de palas eólicas. Su creciente utilización se debe a una combinación de factores técnicos y económicos, entre los que destacan la reducción de los costes de producción, una mayor resistencia y durabilidad, así como una capacidad significativamente superior para la recuperación y reutilización de materias primas al término de su ciclo de vida [2].

El presente artículo compara la sostenibilidad ambiental de palas de turbina eólica de fibra de vidrio fabricadas con una resina epoxi termoestable [3] y con una resina termoplástica, Akelite fabricada en el CSIC a escala de laboratorio [4]. Se trata de una resina con gran potencial para su uso en la economía circular ya que puede ser reciclada mediante un proceso sencillo poco intensivo en materiales o energía. Para llevar a cabo la comparación, se ha aplicado la metodología de Análisis de Ciclo de Vida con el fin de cuantificar la huella ambiental asociada a cada tipo de pala. La perspectiva que ofrece el enfoque de Ciclo de Vida resulta esencial para evaluar el potencial de futuras aplicaciones de nuevos materiales, promoviendo así los principios de la economía circular y la incorporación de fuentes de energía renovable.

2. Metodología

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es un método sistemático que permite evaluar las cargas ambientales asociadas con un producto o proceso. Permite la identificación de las etapas o elementos más críticos del proceso, permitiendo encontrar soluciones alternativas. Este enfoque proporciona una visión holística de los aspectos ambientales asociados con un bien o servicio, lo que resulta esencial para la toma de decisiones informadas en busca de la sostenibilidad. La metodología del análisis de ciclo de vida está estandarizada mediante las normas internacionales ISO 14040[5] e ISO 14044 [6]. Un ACV se compone de cuatro fases en un proceso iterativo que permiten conducir un análisis exhaustivo:

- Definición del objetivo y el alcance estudio y se delimitan los aspectos y etapas del ciclo de vida que se van a incluir, así como los límites del sistema a estudiar.
- Inventario del ciclo de vida: se recopila información detallada sobre las entradas y salidas de cada etapa del ciclo de vida. Esto incluye recursos naturales, energía, emisiones atmosféricas o residuos, etc.
- Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida, en la que se cuantifican los efectos ambientales potenciales asociados con las entradas y salidas identificadas en el inventario. Para ello, se utilizan modelos y métodos que permiten cuantificar el impacto en categorías como el cambio climático, el agotamiento de recursos o la toxicidad, entre otros.
- Interpretación de resultados: los resultados se interpretan en el contexto de los objetivos establecidos al principio del proceso. En esta fase, se identifican áreas de mejora y se proporcionan recomendaciones para minimizar el impacto ambiental.

Para llevar a cabo este proceso de la manera más completa posible, se requiere la recopilación de datos detallados en cada una de las etapas del ciclo de vida, abarcando desde la obtención de materias primas hasta su disposición final. En este trabajo se ha realizado el ACV utilizando el software especializado SimaPro y se han utilizado escenarios de referencia de la base de datos de reconocido prestigio Ecoinvent [7].

2.1. Objetivo y alcance

El objetivo es evaluar el impacto ambiental asociado al ciclo de vida de una pala de turbina eólica fabricada con la resina altamente reciclable Akelite, y compararlo con el ciclo de vida de una pala convencional con resina Epoxi. Se han evaluado las etapas de fabricación de la resina, fabricación de la pala y fin de vida, siendo un proceso de reciclado en el caso de la pala manufacturada con Akelite, e incineración en el caso de la pala fabricada con resina Epoxi.

Se han identificado diversas etapas y subetapas en la fabricación y el fin de vida como muestran la Figura 1 y la Figura 2, y abarcan la etapa de producción de las resinas y la etapa de fabricación de las palas, así como las etapas correspondientes al fin de vida (reciclaje de la pala reciclable y tratamiento de residuos mediante incineración de la pala elaborada con resina Epoxi).

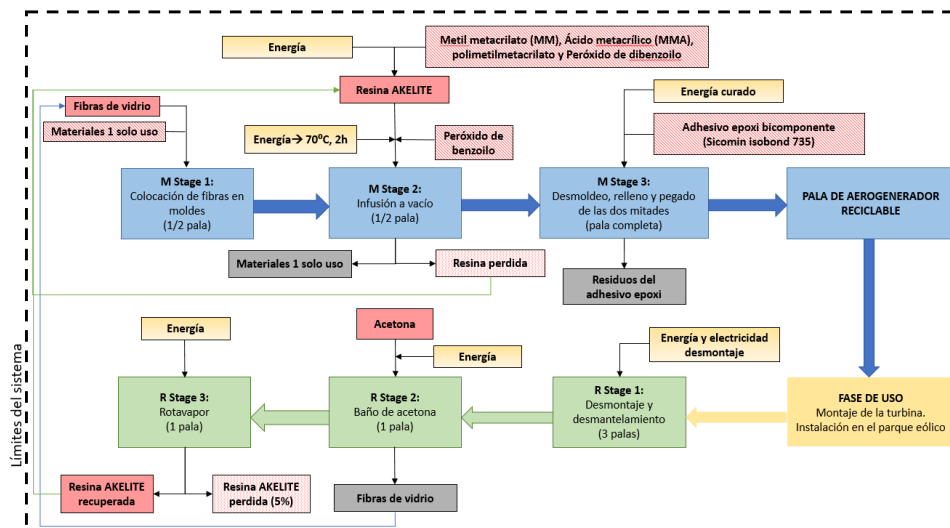


Figura 1. Diagrama de flujo para el ACV de la manufactura de la pala reciclable con resina AKELITE

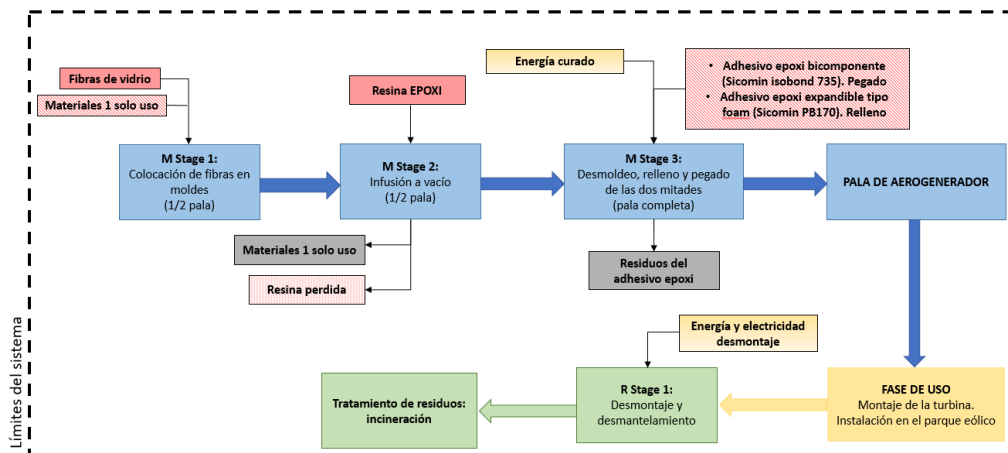


Figura 2. Diagrama de flujo para el ACV de la manufactura de la pala convencional fabricada con resina EPOXI

2.2. Análisis del inventario ACV

En esta sección se describen en detalle las etapas, los procesos y datos utilizados para la elaboración del inventario. Se ha subdividido en producción de las resinas, fabricación de las palas, uso y fin de vida.

La pala de turbina eólica fabricada con Akelite ha sido fabricada y validada a escala de laboratorio [3,9]. Se han utilizado datos primarios de los procesos y balances de materiales y energía de la fabricación de ambas palas a escala de laboratorio.

No se han incluido los procesos específicos de transporte de las materias primas hasta el lugar de manufactura. En los consumos de electricidad de los escenarios elaborados se ha utilizado un escenario modelado del mix eléctrico en España en el 2023 (datos de Red Eléctrica Española).

2.2.1. Producción de las resinas

Akelite es una resina acrílica reactiva que polimeriza añadiendo un 3% de peróxido de benzoilo como iniciador a una temperatura de 70 °C durante 2 horas. Tras su uso, se puede recuperar mediante un simple baño de acetona durante 24 horas a 23 °C. Este polímero ha sido desarrollado recientemente [4]. Con datos primarios de fabricación de la resina Akelite, se ha creado un proceso específico para su producción. Las principales materias primas son monómeros acrílicos y peróxido de benzoilo. Es necesario aportar energía eléctrica al proceso. Se ha considerado la infraestructura tipo de una industria química orgánica.

Respecto a la resina Epoxi, el escenario de ciclo de vida utilizado se ha basado en un escenario de producción europeo existente en la base de datos Ecoinvent modificado para incorporar un mix eléctrico actualizado (mix eléctrico español en 2023, mismo en la producción de ambas resinas).

2.2.2. Etapa de fabricación de las palas

Las tres primeras etapas del proceso de fabricación de la pala utilizando resina Akelite y resina Epoxi son iguales. La diferencia se presenta en la segunda etapa, correspondiente al momento en que la resina se incorpora a las fibras de vidrio para conformar el material compuesto reforzado.

1) Primera etapa de manufactura (M Stage 1): colocación de fibras en moldes. Esta primera etapa consiste en colocar las fibras de vidrio comerciales en los moldes. Este proceso es igual para ambas palas. Las entradas de materiales y energía de esta etapa se detallan en la Tabla 1. Todos estos materiales son de un solo uso, excepto las fibras de vidrio que se incorporan a la pala. La única salida identificada en esta etapa corresponde a las fibras de vidrio, las cuales son dispuestas estratégicamente en los moldes. Cabe señalar que las palas desarrolladas en el presente proyecto se fabrican en dos mitades, que posteriormente son ensambladas. Por tanto, las cantidades reflejadas en la Tabla 1, corresponden a la fabricación una mitad.

2) Segunda etapa de manufactura (M Stage 2): Infusión al vacío. En esta etapa del proceso, ambas resinas se incorporan a las fibras previamente dispuestas en los moldes (etapa anterior M_Stage 1) mediante la técnica de moldeo por transferencia de resina asistida por vacío (*Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding*, VARTM) [8]. Las cantidades de materiales y energía de esta etapa se detallan en la Tabla 2 para la pala reciclable y en la Tabla 3 para la pala convencional. Las entradas son las fibras colocadas en los moldes provenientes de la etapa anterior, la resina Akelite o la resina Epoxi. Además, en el caso de la pala reciclable se requiere, el peróxido de benzoilo, que actúa como iniciador de la reacción de polimerización, y un aporte de energía eléctrica para mantener una temperatura constante de 70 °C durante un período de dos horas, conforme a las condiciones experimentales definidas para garantizar la correcta polimerización de la matriz. Las salidas correspondientes a esta etapa comprenden la obtención de una de las

mitades de la pala eólica, así como una pérdida estimada de resina Akelite. En el caso de la pala que usa la resina Epoxi no se requiere un iniciador, se añade la resina comercial directamente sobre las fibras de vidrio colocadas para crear el material compuesto reforzado.

En cuanto a los materiales de un solo uso empleados durante esta fase, si bien su destino final puede variar (reciclaje de plásticos, vertedero, incineración, residuos sólidos mezclados o residuos peligrosos), en el marco experimental actual y debido al bajo volumen generado, estos residuos se gestionan como residuos de laboratorio. No obstante, en un proceso de fabricación industrial a gran escala, su destino podría variar siendo el reciclaje de plásticos.

La producción del peróxido de benzoilo ha sido modelado considerando los requerimientos de materiales y energía de acuerdo a la literatura [9]. El peróxido de benzoilo se prepara tratando peróxido de hidrógeno con cloruro de benzoilo en condiciones alcalinas según la ecuación 1.

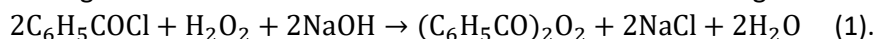


Tabla 1. Entradas y salidas de materiales y energía en la etapa M_Stage1.

Entrada	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Capas de fibra de vidrio	2.6	kg	Glass fibre, at plant/RER U
Realease Agent film	0.1	kg	Alkyd resin, long oil 70% in white spirit, at plant/RER U
Recubrimiento protección UV	0.5	kg	Polyester resin, unsaturated, at plant/RER U
Malla de distribución	1	kg	Polypropylene, granulate, at plant/RER U, 0.25 kg. Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U, 0.75 kg. Transforming of plastic sheets {GLO} market for Cut-off, U
Peel ply	0.1	kg	Alkyd paint, white, 60% in solvent, at plant
Tubos de vacío	2.8	kg	Polyethylen, LDPE, granulate, at plant/RER U + Extrusion, plastic pipes {GLO} market for Cut-off, U
Tubos de llenado	1.12	kg	Polyethylen, LDPE, granulate, at plant/RER U + Extrusion, plastic pipes {GLO} market for Cut-off, U
Taky tape	20	m	Sealing tape, aluminium/PE. 50 mm wide {RER} production Cut-off
Bolsa de vacío	0.3	kg	Nylon 6-6 {GLO} market for Cut-off, U + Extrusion, co-extrusion {FR} of plastic sheets Cut-off, U
Salida	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Fibras + gelcoat colocadas en moldes (1 mitad de pala)	3.1	kg	M_Stage1 Blade, laying up fibres in molds (1 half)

Tabla 2. Entradas y salidas de materiales y energía en la etapa M_Stage2 para la pala reciclable (basada en Akelite).

Entrada	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Fibras en moldes de la etapa 1	1	p	M_Stage1 Blade, laying up fibres in molds (1 half)
Resina Akelite	1	kg	AKELITE, liquid {RER} production Cut-off, U
Peróxido de benzoilo	0.03	kg	Benzoyl peroxide
Energía	10	kWh	Electricity, médium voltage, production ES, at grid/ ES U
Salida	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Fibras + resina Akelite	1	media pala	M_Stage2 Vacuum infusion (1 half)
Resina perdida	0.3	kg	AKELITE, liquid {RER} production Cut-off, U

Tabla 3. Entradas y salidas de materiales y energía en la etapa M_Stage2 para la pala convencional (basada en Epoxi).

Entrada	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Fibras en moldes de la etapa 1	1	media pala	M_Stage1 Blade, laying up fibres in molds (1 half) EPOXI
Resina Epoxi	1	kg	Epoxi resin, liquid {RER} market for Epoxi resin, liquid Cut-off, U*
Energía	10	kWh	Electricity, médium voltage, production ES, at grid/ ES U
Salida	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Fibras + resina Epoxi	1	p	M_Stage2 Vacuum infusion (1 half)

3) Tercera etapa de manufactura (M_Stage 3): Desmoldeo, relleno y pegado de las dos mitades.

Al finalizar la etapa anterior se obtiene una mitad de pala. Tras la fabricación de otra unidad, las mitades se ensamblan para conformar una pala completa. Para ello, se emplea un adhesivo Epoxi bicomponente e implica un consumo energético destinado al curado térmico del adhesivo. Las cantidades se detallan en la Tabla 4. Cabe destacar que, en condiciones industriales de

fabricación, las palas suelen incorporar una espuma de resina Epoxi como material de relleno. En el presente estudio experimental a escala de laboratorio, se optó por prescindir de ello.

Tabla 4. Procesos del Inventario SimaPro M_Stage3.

Entrada	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Mitad de pala obtenida en la Etapa 2	2	p	M_Stage2 Vacuum infusion (1 half)
Adhesivo Epoxi bicomponente	0.5	kg	Epoxi resin, liquid {RER} production Cut-off, U
Energía para el curado	5	kWh	Electricity, medium voltage, production ES, at grid/ES U 2023
Salida	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Pala ensamblada por completo	1	p	M_Stage3 Filling and gluing unmolded blade halves + Unmolding (1blade)
Retales de composite (Fibra + resina) recortados	1	kg	Habría que añadirlo como residuo.

2.2.3. Etapa de uso.

Una vez concluido el proceso de fabricación de las palas eólicas, se incorporan al aerogenerador, con el propósito de proceder a la instalación de múltiples unidades que conformarán un parque eólico operativo. No se han considerado cargas en esta etapa.

2.2.4. Etapa de fin de vida.

Al alcanzar el final de su vida útil, las palas del aerogenerador son sometidas a un proceso de desmontaje y desmantelamiento. Una vez alcanzado este punto, las dos palas siguen caminos distintos. La pala fabricada con resina Epoxi, al finalizar su vida útil, es desmontada y enviada al tratamiento convencional de estos residuos, en este caso incineración de residuos peligrosos. La cantidad de material son 4 kg (peso total de la pala). Más detalle sobre los balances de materia y energía esta etapa puede encontrarse en la literatura [10, 11]. En cambio, la pala reciclable continúa con un proceso de reciclaje, el cual se detalla a continuación:

1) Primera etapa de reciclaje (R_Stage 1): Desmontaje y desmantelamiento.

Como resultado de esta etapa, se obtienen las distintas partes del aerogenerador, como las palas. En esta etapa solo aparece el Input de la energía necesaria para el desmontaje y desmantelamiento de las palas.

2) Primera etapa de reciclaje (R_Stage 2): Baño de acetona y recuperación de las fibras.

En esta fase del proceso, el proceso de reciclaje se lleva a cabo de manera simultánea para un conjunto de tres palas. Las palas son sometidas a un baño de acetona para disolver la resina que recubre las fibras de vidrio, facilitando así la recuperación de las fibras. El baño se lleva a cabo durante 24 horas a temperatura ambiente (24 °C). Las cantidades se incluyen en la Tabla 5.

Tabla 5. Procesos del Inventario SimaPro R_Stage1

Entrada	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Palas desmontadas en la Etapa R1	0.3	p	R_Stage 1 Dismantelation & Disassembly (3 Blades)
Acetona	21	kg	Acetone liquid {RER} production APOS, U
Electricidad	10	kWh	Electricity, medium voltage, production ES, at grid/ES U 2023
Salida	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Mezcla resina-acetona	21,4	kg	R_Stage 2 Acetone bath (fibres recovery)
Salida conocida a la tecnosfera. Producto evitado	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Fibras recuperadas	4.5	kg	Glass fibre, at plant/RER U

3) Tercera etapa de reciclaje (R_Stage 2): R_Stage 3: Rotavapor (recuperación de la resina).

La última etapa del proceso de reciclaje tiene como objetivo la recuperación de la resina Akelite empleada en la fabricación de las palas, la cual se encuentra mezclada con acetona. Para ello, se procede a la eliminación de la acetona mediante evaporación, utilizando un sistema de evaporación rotacional (rotavapor), que facilita la separación de ambos componentes. La entrada

principal de esta fase corresponde a la mezcla de resina y acetona. Se requiere energía eléctrica para asegurar el correcto funcionamiento. La Tabla 6 recoge las cantidades de entradas y salidas.

Tabla 6. Procesos del Inventario SimaPro R_Stage3

Entrada	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Mezcla resina-acetona	21,4	kg	R_Stage 2 Acetone bath (fibres recovery)
Electricidad	20	kWh	Electricity, medium voltage, production ES, at grid/ES U 2023
Salida	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Resina recuperada	1	kg	R_Stage 3 Rotavapor (EoL)
Salida conocida a la tecnosfera. Producto evitado	Cantidad	Unidad	Proceso SimaPro
Acetona recuperada	12.84	kg	Acetone liquid {RER} production APOS, U

2.3. Evaluación del impacto ambiental.

El método utilizado para evaluar el impacto ambiental de las palas ha sido el *Environmental footprint* (EF method 2.0) [12]. Este método recomendado por la Comisión Europea incluye 16 categorías de impacto ambiental.

3. Resultados y discusión

Los resultados de la evaluación de la huella ambiental de la producción de las resinas ofrecen resultados dispares, cada resina tiene un mejor desempeño ambiental en unas categorías. En muchas de las categorías de impacto la resina Epoxi alcanza mejores resultados. En el caso de la categoría de Cambio Climático (CC), la fabricación de la resina reciclable alcanza los 7.62 kgCO₂ eq./kg y la Epoxi 3.95 kgCO₂ eq./kg, siendo el proceso más impactante la producción del MMA. Destaca además el mayor impacto de la fabricación de Akelite en la categoría de escasez de agua en que el impacto es 413% mayor debido al uso de electricidad por kg de resina producido.

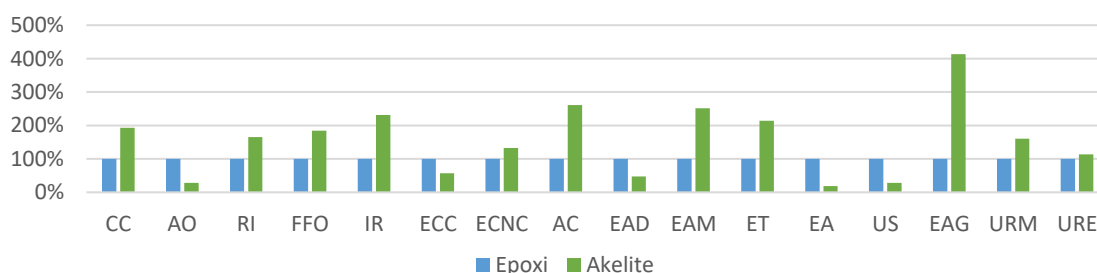


Figura 3. Comparativa de resultados de Huella ambiental de la producción de las resinas para las 16 categorías. Cambio climático (CC), Agotamiento de la capa de ozono (AO), Radiación ionizante (RI), Formación fotoquímica de ozono, (FFO) Inorgánicos respiratorios (IR), Efectos no cancerígenos en la salud humana (ECC), Efectos cancerígenos en la salud humana (ECNC), Acidificación terrestre y de agua dulce (AC), Eutrofización del agua dulce (EAD), Eutrofización de agua marina (EAM), Eutrofización terrestre (ET), Ecotoxicidad agua dulce (EA), Uso del suelo (US), Escasez de agua (EAG), Utilización de recursos-vectores energéticos (URM), Utilización de recursos-minerales y metales (URE).

Los resultados de la evaluación de la fabricación de las palas y del ciclo de vida se muestran en la Tabla 7. La comparación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 4. Los resultados muestran que la fabricación de la pala reciclable es peor ambientalmente en todas las categorías de impacto. En la categoría de CC, mientras que la pala convencional tiene un impacto de 1250 kg de CO₂ eq., la pala reciclada alcanzaría los 1680 kg de CO₂ eq. Sin embargo, cuando se incluye la etapa de fin de vida (incineración), la pala convencional fabricada con resina Epoxi resultaría en los mayores impactos ambientales en todas las categorías excepto en radiación ionizante y en escasez o agotamiento de agua. En el caso de la categoría de CC, al incluir el fin de vida, la pala Epoxi tendría un impacto de 1340 kg de CO₂ eq., mientras que la pala reciclable tendría un impacto de 838 kg. de CO₂ eq. Esto se debe a que la resina reciclable permite la recuperación de material que puede ser utilizado en otro proceso, evitando la producción de nuevo material.

Tabla 7. Resultados de Huella Ambiental de la fabricación de las palas (una pala).

Categoría de impacto	Unidad	Manufactura de la pala		Ciclo de Vida de una pala	
		Pala Convencional (Epoxi)	Pala Reciclable (Akelite)	Pala Convencional (Epoxi)	Pala Reciclable (Akelite)
Cambio climático	kg CO ₂ eq	1,25E+02	1,68E+02	1,34E+02	8,38E+01
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 eq	7,17E-06	9,06E-06	7,69E-06	3,81E-06
Radiación ionizante, HH	kBq U-235 eq	1,69E+01	3,02E+01	1,77E+01	1,85E+01
Formación fotoquímica de ozono, HH	kg NMVOC eq	4,18E-01	5,81E-01	4,27E-01	2,84E-01
Inorgánicos respiratorios	disease inc.	5,29E-06	7,07E-06	5,40E-06	3,96E-06
Efectos no cancerígenos sobre la salud humana	CTUh	1,46E-05	1,67E-05	1,55E-05	4,63E-06
Efectos cancerígenos en la salud humana	CTUh	1,90E-06	2,23E-06	2,28E-06	9,72E-07
Acidificación terrestre y de agua dulce	mol H ⁺ eq	6,62E-01	1,03E+00	6,76E-01	5,70E-01
Eutrofización del agua dulce	kg P eq	2,96E-02	4,05E-02	3,28E-02	1,67E-02
Eutrofización de agua marina	kg N eq	1,16E-01	1,67E-01	1,19E-01	7,64E-02
Eutrofización terrestre	mol N eq	1,28E+00	1,82E+00	1,31E+00	1,27E+00
Ecotoxicidad agua dulce	CTUe	1,08E+02	1,22E+02	1,23E+02	4,49E+01
Uso del suelo	Pt	4,23E+02	4,57E+02	4,28E+02	2,20E+02
Escasez de agua	m ³ depriv.	6,46E+03	1,44E+04	6,84E+03	9,83E+03
Utilización de recursos, vectores energéticos	MJ	2,57E+03	3,29E+03	2,62E+03	1,89E+03
Utilización de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	2,72E-04	3,35E-04	2,77E-04	1,49E-04



Figura 4. Comparativa de resultados de Huella Ambiental de la etapa de manufactura (gráfica A) y del ciclo de vida (gráfica B). Cambio climático (CC), Agotamiento de la capa de ozono (AO), Radiación ionizante (RI), Formación fotoquímica de ozono, (FFO) Inorgánicos respiratorios (IR), Efectos no cancerígenos en la salud humana (ECC), Efectos cancerígenos en la salud humana (ECNC), Acidificación terrestre y de agua dulce (AC), Eutrofización del agua dulce (EAD), Eutrofización de agua marina (EAM), Eutrofización terrestre (ET), Ecotoxicidad agua dulce (EA), Uso del suelo (US), Escasez de agua (EAG), Utilización de recursos, vectores energéticos (URM), Utilización de recursos, minerales y metales (URE).

Este análisis presenta diversas limitaciones. En primer lugar, respecto al alcance del ACV y los procesos incluidos en el inventario, los procesos de transporte deben ser analizados e incluidos. En segundo lugar, hay que considerar que, aunque comparamos la producción de dos resinas y la fabricación de las correspondientes palas, se compara la producción de Epoxi a escala industrial con la fabricación de Akelite a escala de laboratorio, por lo que la optimización de los procesos puede dar lugar a la mejora ambiental de la fabricación por unidad de masa o por unidad producida. Finalmente, no se han presentado los resultados de la evaluación ambiental del ciclo de vida de una nueva pala manufacturada con la resina reciclada como se había previsto dadas las limitaciones mencionadas. Mediante el escalado de los procesos a escala industrial, se propone como línea futura el análisis de los resultados y la evaluación de la etapa adicional de remanufacturado o manufactura de una pala de segunda generación (reciclada y reciclable) utilizando datos de inventario escalados para arrojar resultados finales de la evaluación de una pala reciclada y reciclable. Además, otros materiales o componentes de la pala de aerogenerador podrían ser evaluados para ser sustituidos como las fibras de vidrio por fibras de carbono, o los tratamientos de fin de vida de la pala no reciclable.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha evaluado una estrategia de economía circular basada en la sustitución de un material no reciclable por otro reciclable en el sector de la energía eólica. Los resultados han demostrado que es necesario evaluar el ciclo de vida completo de la pala, incluyendo el uso, el proceso de reciclaje, la recuperación de resina y la fabricación de nuevas palas. Los resultados de la evaluación del ciclo completo indican que, pese a que la fabricación del material reciclable y de la pala fabricada con el mismo presentan un impacto mayor en casi todas y en todas las categorías de impacto incluidas en el método de Huella Ambiental, el beneficio de ser recuperado mediante un proceso de reciclaje es tal, que revierte los resultados y se puede concluir que la pala reciclable tiene un impacto menor en todas las categorías de impacto. El enfoque de ciclo de vida es vital para evaluar las aplicaciones de materiales para favorecer el despliegue sostenible y circular de las energías renovables.

Por último, se han considerado algunas posibles mejoras que podrían implementarse en el futuro en el ACV. Una de las principales es la reducción del uso de adhesivo epoxi para unir las dos mitades de las palas, reemplazándolo por un proceso de termo conformado que permitiría ensamblarlas sin necesidad de aplicar más adhesivo. Por otro lado, si bien es cierto que, en el mantenimiento de las palas durante su vida útil, las reparaciones de las palas termoplásticas en algunos casos serían más económicas ya que algunas de las laminaciones de fibras superficiales se podrían reparar aplicando calor en vez de lijar, añadir fibra y más resina epoxi en el caso de las palas con resina termoestable (epoxi). Este punto también podría añadirse como mejora en el ACV en el futuro.

Agradecimientos

Los autores agradecemos el apoyo financiero del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España a través del proyecto coordinado SUCCESS BLADE (TED2021-130201B-C31 y TED2021-130201B-C33), cofinanciado por NextGenerationEU, Unión Europea).

5. Bibliografía

- [1] A. Eberle, A. Cooperman and J. Walzberg, "Materials Used in U.S. Wind Energy Technologies: Quantities and Availability for Two Future Scenarios," NREL, 2023

- [2] R. E. Murray, R. Beach, D. Barnes, D. Snowberg, D. Berry, S. Rooney and M. Jenks, "Structural validation of a thermoplastic composite wind turbine blade with comparison to a thermoset composite blade," *Renewable Energy*, vol. 164, pp. 1100-1107, 2021.
- [3] R. Carnicero, L. Cano, I. Cruz, "The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2024) *Journal of Physics: Conference Series* 2767 072008(2024). DOI:10.1088/1742-6596/2767/7/072008.
- [4] R. Verdejo and M. A. López-Manchado, "Polímeros reforzados con fibras basados en matrices termoplásticas," (PatentN0. PCT/ES2021/070751), 2021.
- [5] ISO. ISO 14040:2006(es). Gestión ambiental — ACV — Principios y marco de referencia
- [6] ISO. ISO 14044:2006(es). Gestión ambiental — ACV — Requisitos y directrices, 2006.
- [7] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230. Available at: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>> [Accessed 09 04 2025].
- [8] A. Hindersmann, "Confusion about infusion: An overview of infusion processes," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 126, 2019.
- [9] Academia Lab. (2025). Peróxido de benzoilo. Enciclopedia. Revisado el 9 de abril del 2025. <https://academia-lab.com/enciclopedia/peroxido-de-benzoilo/>
- [10] Carnicero, R., Cano, L., Lopez-Manchado, M.A., and Verdejo, R. "Manufacturing, Testing and Recycling of a small recyclable wind turbine Blade", *J. Phys.: Conf. Ser.* 2265 032013 (2022) DOI 10.1088/1742-6596/2265/3/.
- [11]Rafael Carnicero et al 2024 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2767 072008. DOI 10.1088/1742-6596/2767/7/072008
- [12] European Commission: Joint Research Centre, Fazio, S., Zampori, L., De Schryver, A., Kusche, O. et al., *Guide for EF compliant data sets*, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/537292>