



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

**Análisis de Ciclo de Vida y Costes de las
palas de los aerogeneradores:
Comparación de alternativas de reciclaje**

Autor:

Martín Gobernado, Lucía

Tutor(es):

**Segovia Puras, José Juan
Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

**Esteban Cañibano Álvarez
Departamento CA, IT Y MMC Y TE**

Valladolid, Julio 2024.

RESUMEN

Hoy en día, la energía eólica es una de las principales fuentes de energía en España, lo que ha llevado al aumento significativo de la producción de los aerogeneradores y, consecuentemente, del número de palas. Este incremento ha encendido las alarmas sobre el impacto ambiental y económico de su ciclo de vida. Por ello, en este trabajo se ofrece un análisis detallado del ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores, desde la extracción de materias primas hasta el reciclaje final, incluyendo un análisis exhaustivo de costes. Además, se evalúan distintas alternativas de reciclaje, con el fin de identificar las opciones más rentables y sostenibles. Este estudio proporciona una visión completa y urgente sobre el futuro del reciclaje de las palas de los aerogeneradores, destacando la necesidad de soluciones innovadoras que minimicen el impacto ambiental y optimicen los recursos.

Palabras clave: Ciclo de vida, aerogenerador, reciclaje, sostenible y GaBi.

ABSTRACT

Nowadays, wind energy is one of the main sources of energy in Spain, which has widely increased the production of wind generators, and consequently, of blades. This increase has raised the alarm about the environmental and economic impact of their life cycle. Due to it, in this report we show a detailed analysis of the life cycle of the blades in the wind generators, since the removal of raw material to the final recycle, including a wide analysis of costs. Moreover, we evaluate different alternatives of recycling, to identify the more profitable and sustainable options. This report provides a thorough and urgent view of the future of recycling of the blades in the wind generators, highlighting the need of innovative solutions which reduce the environmental impact and optimize the resources.

Keywords: life cycle, wind turbine, recycling, sustainable and GaBi

Índice

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1.	<i>Introducción.....</i>	1
1.2.	<i>Objetivos.....</i>	3
1.3.	<i>Contenido de trabajo.....</i>	3
2.	ESTADO DE LA TÉCNICA.....	5
2.1.	<i>Energía eólica en España.....</i>	5
2.2.	<i>Análisis de Ciclo de Vida.....</i>	8
2.2.1.	<i>Introducción.....</i>	8
2.2.2.	<i>Metodología.....</i>	9
3.	SIMULACIÓN EN GABI.....	25
3.1	<i>Etapas.....</i>	25
3.3.1.	<i>Extracción materias primas.....</i>	25
3.3.2.	<i>Fabricaciones materiales auxiliares.....</i>	28
3.3.3.	<i>Procesos de fabricación.....</i>	31
3.3.4.	<i>Transporte.....</i>	36
3.3.5.	<i>Reciclaje y reutilización.....</i>	37
3.3.6.	<i>Fin de vida.....</i>	40
4.	COSTES.....	43
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES.....	53
5.1	<i>Análisis de impacto económico.....</i>	53
5.2	<i>Análisis impactos ambientales.....</i>	55
5.2.1.	<i>Análisis de impactos ambientales por midpoints.....</i>	55
5.2.2.	<i>Análisis de impactos ambientales por endpoints.....</i>	60
5.1.	<i>Análisis conjunto de impactos ambientales y económicos.....</i>	62
6.	CONCLUSIONES.....	63
6.1.	<i>Conclusiones generales.....</i>	63
6.2.	<i>Conclusiones específicas.....</i>	63
6.3.	<i>Líneas de mejora.....</i>	64
	Bibliografía.....	67
	Anexos 73	
	Anexo I: Simulación de los componentes en GaBi.....	73
	Anexo II: Simulación del ciclo de vida en GaBi.....	77

Índice de figuras

Figura 1: Etapas del ciclo de vida de un producto	1
Figura 2: Perfil aerodinámico de una pala [3].....	2
Figura 3: Estructura materiales compuestos [5]	2
Figura 4: Estructura de generación en 2022 [6]	5
Figura 5: Mapa parques eólicos en España [6]	6
Figura 6: Evolución anual y acumulada de la potencia instalada en España [6]	6
Figura 7: Generación de energía eólica en los últimos años a nivel nacional [7]	7
Figura 8: Antigüedad parques eólicos en España [4].....	7
Figura 9: Trilema energético.....	8
Figura 10: Etapas del ciclo de vida	9
Figura 11: Fases del Análisis de Ciclo de Vida. [1]	10
Figura 12: Ejemplo de un plano simulado en GaBi.....	11
Figura 13: Medidas de una pala de aerogenerador [13]	11
Figura 14. Enfoques de ciclo de vida [12].....	12
Figura 15: Estructura pala de aerogenerador [13].....	13
Figura 16: Moldeo por infusión [13]	14
Figura 17: Reciclaje y disposición final [14].....	15
Figura 18: Reutilización de las palas en parques infantiles [15]	16
Figura 19: Reutilización de palas en mobiliario urbano [16].....	16
Figura 20: Marquesina para bicicletas con palas desinstaladas [17]	16
Figura 21: Techos de viviendas con palas reutilizadas [4]	17
Figura 22: Proceso de reciclado mecánico	18
Figura 23: Proceso reciclaje térmico	18
Figura 24: Proceso reciclaje químico.....	19
Figura 25: Esquema de relación entre impactos de efectos intermedios y efectos finales	21
Figura 26: Plano modelado clip de acero [Tutorial de GaBi].....	24
Figura 27: Resultado clip de acero [Tutorial GaBi]	24
Figura 28: Procesos de obtención de materias primas en GaBi.....	26
Figura 29: Ejemplo de algunos de los flujos de entrada del proceso de obtención del PVC	27
Figura 30: Ejemplo de algunos de los flujos de salida del proceso de obtención del PVC	27
Figura 31: Esquema conjunto de la obtención y transporte de materias primas en GaBi.	27
Figura 32: Esquema de fabricación y transporte del agente desmoldeante en GaBi	28
Figura 33: Esquema de fabricación bolsa de vacío y Peel Ply en GaBi	29
Figura 34: Esquema de fabricación del adhesivo en GaBi.....	31
Figura 35: Esquema de fabricación del pararrayos en GaBi.....	31
Figura 36: Máquina de corte Gerber Technology Z1 [23]	32
Figura 37: Esquema de pretratamiento fibras de vidrio en GaBi	32
Figura 38: Esquema de preparación resina epoxi en GaBi	32

Figura 39: Esquema procesos de preforma y corte por láser en GaBi.....	33
Figura 40: Proceso de lay-up para una placa de material compuesto [24].....	34
Figura 41: Esquema de proceso de ensamblaje en GaBi	35
Figura 42: Esquema de etapa de fabricación en GaBi.....	36
Figura 43: Esquema etapa de reciclaje mecánico en GaBi	39
Figura 44: Esquema etapa de reciclaje térmico en GaBi.....	39
Figura 45: Esquema etapa de reciclaje químico en GaBi	40
Figura 46: Esquema etapa de reúso en GaBi.....	40
Figura 47: Costes de obtención de materiales y de fabricación de la pala	53
Figura 48: Costes de reciclaje.....	54
Figura 49: Impacto en el cambio climático	55
Figura 50: Consumo de agua dulce.....	56
Figura 51: Ecotoxicidad terrestre.....	57
Figura 52: Toxicidad humana.....	58
Figura 53: Toxicidad humana, cáncer	58
Figura 54: Comparación de alternativas de reciclaje.....	59
Figura 55: Categoría final de salud humana.....	60
Figura 56: Categoría final de recursos	61
Figura 57: Categoría final de ecosistemas.....	61
Figura 58: Gráfica impacto ambiental-impacto económico	62
Figura 59: Esquema de fabricación de la Viga I en GaBi	73
Figura 60: Esquema de fabricación de la Viga II en GaBi	74
Figura 61: Esquema de fabricación de la Carcasa Inferior.....	75
Figura 62: Esquema de fabricación de la carcasa superior.....	76
Figura 63: Plano final por reciclado mecánico	77
Figura 64: Esquema final por reciclado químico en GaBi	78
Figura 65: Esquema final por reciclado térmico en GaBi.....	79
Figura 66: Esquema final por reúso en GaBi.....	80

Índice de tablas

Tabla 1: Materias primas totales	26
Tabla 2: Cantidad materias primas por componente	26
Tabla 3: Cantidades materiales auxiliares para cada componente	30
Tabla 4: Peso de los moldes.....	30
Tabla 5: Coste materias primas [36]	43
Tabla 6: Coste de los materiales auxiliares [37], [38], [39] y [40]	44
Tabla 7: Amortización de los moldes (primer año)	45
Tabla 8: Coste maquinaria imputado a cada pala [13].....	45
Tabla 9: Costes de mano de obra directa [13].....	46
Tabla 10: Coste de electricidad de cada proceso.....	47
Tabla 11: Coste consumo eléctrico en el triturado mecánico.....	48
Tabla 12: Coste consumo eléctrico pirólisis.....	48
Tabla 13: Coste consumo eléctrico solvólisis	48
Tabla 14: Costes consumo de energía térmica de los reciclados	48
Tabla 15: Coste de transporte de materias primas	49
Tabla 16: Coste de transporte materiales auxiliares.....	49
Tabla 17: Costes de transporte final	50
Tabla 18: Costes directos e indirectos globales	50

Agradecimientos

A la Fundación CIDAUT, donde he tenido el privilegio de realizar mi trabajo y contar con la constante colaboración de sus trabajadores siempre que lo he necesitado.

A José Juan Segovia, gracias por aceptar ser el tutor de mi TFG. Gracias por tus anotaciones para hacer posible la entrega del trabajo.

A Esteban Cañibano, ejemplo de dedicación. Gracias por enseñarme el verdadero significado del esfuerzo y por estar siempre dispuesto a ayudarme. Gracias junto a Maite Fernández por abrirme las puertas de CIDAUT y brindarme la oportunidad de crecer tanto profesional como personalmente.

A Adrian Pedrosa, por tu implicación en el trabajo y por tu inestimable ayuda con el modelo. Siempre dispuesto a ayudar a cualquiera que se lo pida. Tu apoyo ha sido fundamental para sacar el trabajo adelante.

Al departamento de Materiales, Producto y Proceso de la Fundación CIDAUT, por tener siempre una sonrisa para mí, sin importar el día o la hora.

A mis amigos por vuestro apoyo a lo largo del camino. Vuestra compañía y ánimo han sido esenciales para mantenerme motivada.

A mi familia, en especial a mi madre, por soportar los altibajos de todos estos años y por tu apoyo incondicional. Vuestro cariño ha sido fundamental para alcanzar todas las metas propuestas.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

El reciclaje es una práctica fundamental para la gestión sostenible de los recursos y la reducción de los residuos. En el contexto de economía circular, el reciclaje permite reincorporar los materiales al mismo proceso productivo o a otro, disminuyendo la cantidad de materias primas vírgenes y minimizando los impactos ambientales.

Para evaluar la eficiencia y sostenibilidad de todas las etapas de un producto, desde su fabricación hasta su disposición final, se ha comenzado a utilizar metodologías como el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) y el Análisis de Coste de Ciclo de Vida (LCC). Estas metodologías permiten identificar áreas de mejora y definir estrategias para reducir los impactos ambientales y económicos de un producto, proceso o servicio a lo largo de su ciclo de vida. [1] De esta manera, se fomenta la sostenibilidad y la transición hacia una economía circular.

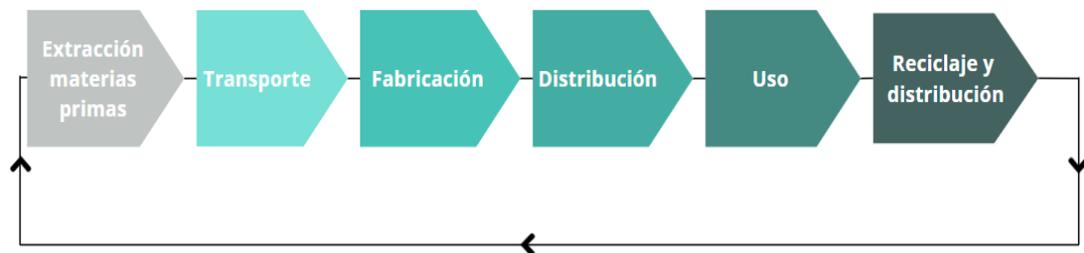


Figura 1: Etapas del ciclo de vida de un producto

Sin embargo, a pesar del progreso en la investigación del Análisis de Ciclo de Vida, cabe destacar la falta de datos fiables y actualizados que dificultan la realización de los estudios de Análisis de Coste de Ciclo de Vida. No obstante, ambas metodologías representan un área prometedora de futuras investigaciones en la mayoría de los sectores. Prueba de ello es la cantidad de softwares en desarrollo, como GaBi, SimaPro u OpenLCA, entre otros que nos permiten evaluar los aspectos ambientales.

La energía eólica se ha convertido en una de las fuentes de energía renovable más importantes del mundo. Las palas de los aerogeneradores son clave en la captación y conversión de la energía eólica en electricidad. Por ello, es esencial que las palas cuenten con un diseño aerodinámico optimizado, que minimice la perturbación del aire y maximice la potencia del viento, reduciendo así la carga sobre ellas y prolongando su vida útil. [2]

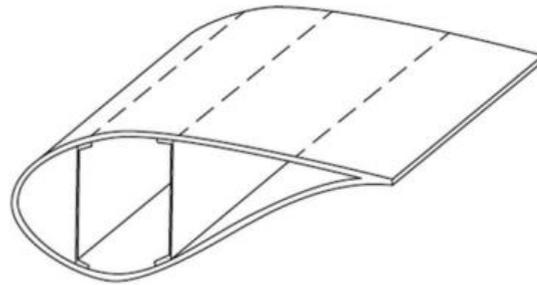


Figura 2: Perfil aerodinámico de una pala [3]

Estas palas están comúnmente construidas con materiales compuestos como fibra de vidrio o fibra de carbono, junto con resinas vinil éster o epoxi. La elección de estos materiales permite una mayor eficiencia en el rendimiento de las palas, posibilitando la fabricación de tamaños más grandes y proporcionando propiedades mecánicas y estructurales superiores. [4]

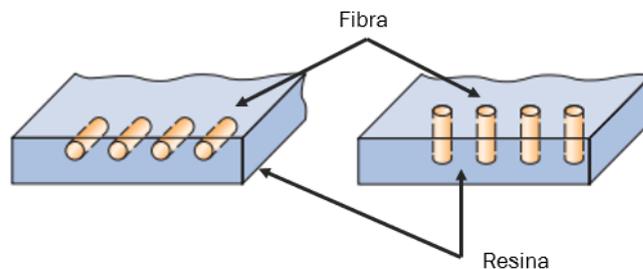


Figura 3: Estructura materiales compuestos [5]

Pese a las ventajas técnicas que ofrecen los materiales compuestos, existe una creciente preocupación en la industria eólica por la dificultad para reciclar estos materiales. La falta de formas efectivas de reciclaje de las palas de los aerogeneradores al final de su vida útil plantea un importante desafío para la industria eólica y para la sostenibilidad, donde los recursos se utilizan de manera eficiente y se minimiza el desperdicio. [4]

Esta preocupación se ha intensificado en los últimos años debido al rápido crecimiento de la potencia instalada de energía eólica a nivel mundial y a la creciente conciencia sobre la necesidad de abordar el cambio climático. Por ello, se ha comenzado a considerar el análisis de los impactos ambientales y económicos en el ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores fomentando la transición hacia la economía circular.

En este contexto, por lo tanto, se pretende analizar los impactos ambientales y económicos de las palas de los aerogeneradores, para identificar áreas de mejora en su diseño, fabricación o reciclaje. Contribuyendo así al desarrollo de estrategias más eficientes y sostenibles en el sector de la energía eólica.

1.2. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo se basa en realizar el Análisis de Ciclo de Vida y Análisis de Coste de Ciclo de Vida de las palas de los aerogeneradores. Para ello, se utilizará el software GaBi, que permitirá analizar los impactos ambientales generados en cada etapa del ciclo de vida de las palas y realizar predicciones sobre su reciclaje futuro. Además, se utilizará la herramienta Excel para analizar los impactos económicos de cada etapa.

Para lograr el objetivo principal, se plantea la consecución de los objetivos que se muestran a continuación:

- Conocer la información relativa a las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida y de Análisis de Coste de Ciclo de Vida. Tratando de comprender sus fundamentos teóricos y sus aplicaciones prácticas en la evaluación de productos, servicios o procesos.
- Familiarizarse con las etapas del ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores. Además, se identificarán los impactos ambientales y costos asociados a cada etapa del ciclo de vida.
- Conocer las distintas alternativas de reciclaje de las palas de los aerogeneradores y analizar estas alternativas en términos de impacto ambiental y viabilidad económica.
- Desarrollar un modelo adecuado de ciclo de vida que nos permita obtener resultados precisos, teniendo en cuenta características únicas del producto y particularidades en su proceso.
- Interpretar los resultados, identificando áreas de mejora y oportunidades de optimización en el ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores.

1.3. Contenido de trabajo

Los capítulos en los que se organiza el trabajo son los siguientes:

En el capítulo 2 se realiza una búsqueda bibliográfica con el fin de obtener el conocimiento necesario para la realización del trabajo. En este capítulo se aborda la evolución de la energía eólica en España, haciendo hincapié en la importancia del reciclado de las palas de los aerogeneradores. Además, se explica paso a paso la metodología utilizada para realizar el análisis de los impactos ambientales y se realiza una breve introducción al software con el que se realiza la simulación del ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores.

Por otro lado, en el capítulo 3 se detalla cómo se ha llevado a cabo la simulación en el software GaBi del análisis de ciclo de vida de las palas de los

aerogeneradores. En esta simulación se abarcan todas las etapas del ciclo de vida de las palas. Además, se presentan los esquemas correspondientes a la simulación para asegurar una correcta comprensión del estudio.

En el capítulo 4 se profundiza en el análisis de costes de ciclo de vida de las palas, elaborando un inventario detallado de los costes incurridos a lo largo de todo su ciclo de vida con el apoyo de la herramienta Excel.

En el capítulo 5 se lleva a cabo la evaluación de los resultados obtenidos, analizando tanto los impactos ambientales como los económicos. Primero, se evalúan los impactos en todas las etapas del ciclo de vida, y posteriormente se comparan los distintos tipos de reciclaje modelados.

En el último capítulo se presentan las conclusiones derivadas del trabajo, abordando también las posibles líneas futuras de mejora.

2. ESTADO DE LA TÉCNICA

2.1. Energía eólica en España

España se posiciona como uno de los líderes mundiales en el desarrollo industrial y tecnológico en el campo de las energías renovables, destacando especialmente en el sector de la energía eólica. Según datos recientes de la Asociación Eólica Española (AEE), el país se posiciona actualmente como quinto en el mundo por potencia eólica instalada, y el segundo en Europa, únicamente superado por Alemania. Este posicionamiento destaca el compromiso de España con el desarrollo y expansión de las energías renovables.

La energía eólica constituye en 2022 aproximadamente el 22% del mix energético nacional en España, superando incluso la energía nuclear en términos de contribución a la producción de electricidad, [6] como se ilustra en la Figura 4, que muestra la cuota de mercado por generación de ese año.

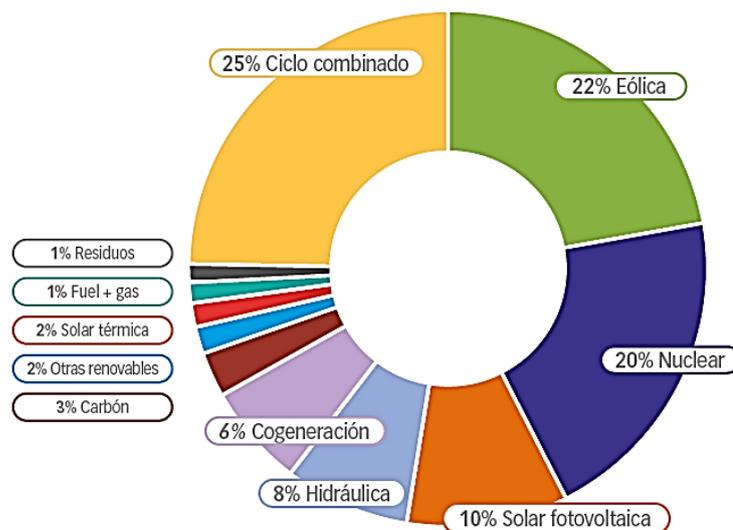


Figura 4: Estructura de generación en 2022 [6]

En el siguiente año, 2023, España alcanzó un hito significativo al satisfacer el 24% de su demanda eléctrica gracias a los más de 22.000 generadores eólicos instalados y distribuidos estratégicamente por todo el país. Este incremento reflejó un avance en la capacidad de generación de la energía eólica. El aumento de la producción de energía eólica ha contribuido significativamente a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. Las regiones con mayor producción de electricidad a través de la energía eólica son Galicia, Castilla y León, Castilla-La Mancha, Andalucía y Aragón, tal y como se muestra en la Figura 5. [6]



Figura 5: Mapa parques eólicos en España [6]

La potencia instalada en España ha ido aumentando a lo largo de los años, como se puede observar en la Figura 6. Hoy, tiene una potencia total instalada de 30 GW, con el objetivo del Plan Nacional de Energía y Clima (PNIEC) de alcanzar una potencia instalada de 50 GW para 2030. [6]

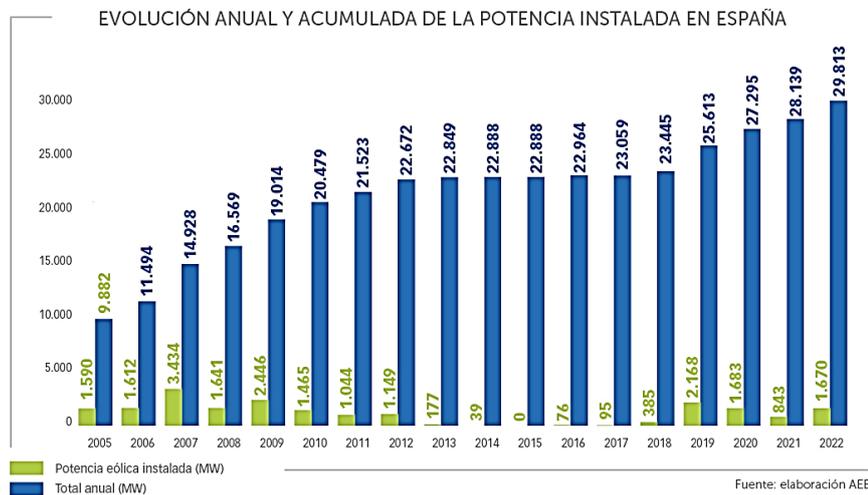


Figura 6: Evolución anual y acumulada de la potencia instalada en España [6]

Además, España alcanza un máximo histórico de generación de energía eólica cada año, llegando a alcanzar en 2023 una cantidad demandada de 62.569 GWh [7], lo que representa un incremento del 12.2% respecto al año 2020. El

crecimiento de esta demanda energética a nivel nacional se puede observar en la Figura 7.

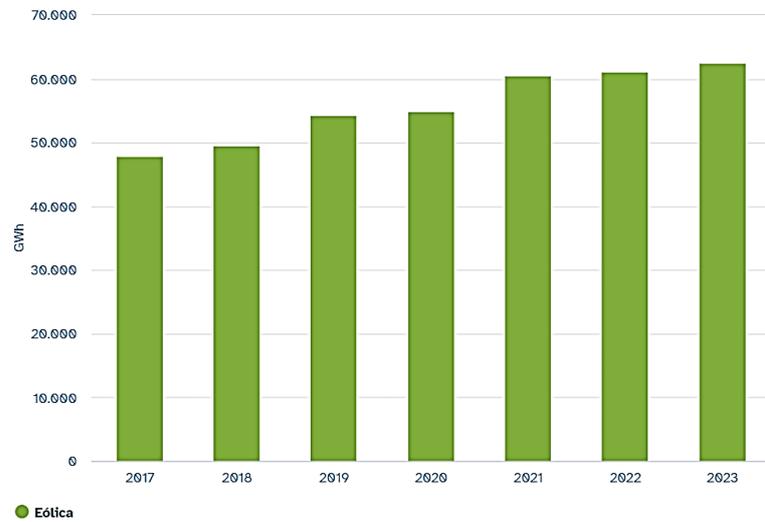


Figura 7: Generación de energía eólica en los últimos años a nivel nacional [7]

El aumento de la demanda energética requiere un incremento en el número de aerogeneradores para cubrirla. Hasta el cierre de 2021, España registraba la presencia de 1.298 parques eólicos, con un total de 21.574 aerogeneradores y 64.722 palas. De estos aerogeneradores, aproximadamente un 72% fueron instalados antes del 2007, lo que implica que tienen más de 15 años de antigüedad, y alrededor de 7.482 unidades superan los 20 años como se puede observar en la Figura 8. Esto sugiere que para 2022, al menos 7.500 aerogeneradores habrían superado la barrera de los 20 años de vida útil. Aunque muchos de estos aerogeneradores podrían prolongar su vida útil hasta los 30 años, el desafío de encontrar soluciones de reciclaje, especialmente para las palas, se presenta como una necesidad inmediata. [4]

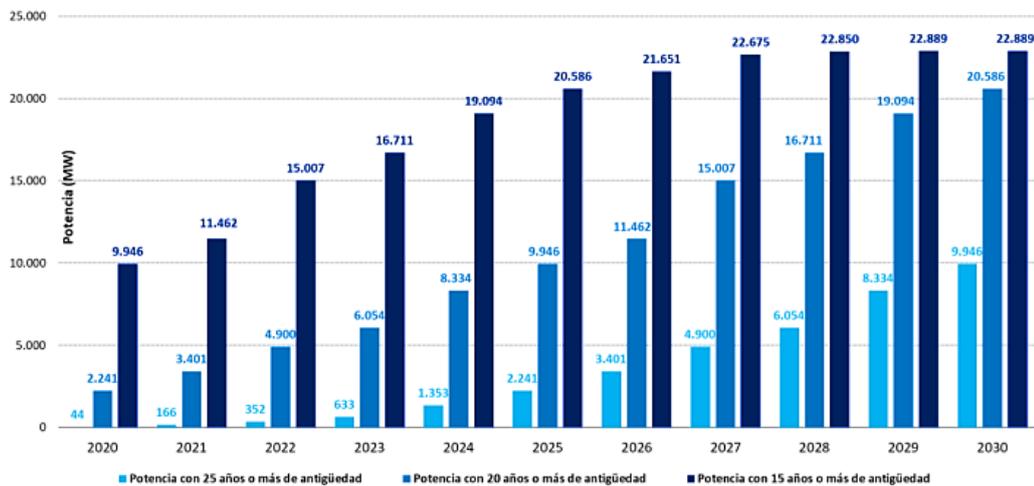


Figura 8: Antigüedad parques eólicos en España [4]

En definitiva, el sector eólico se enfrenta al desafío de gestionar un gran número de aerogeneradores en los próximos años. Para abordar dicha problemática, se están buscando posibles soluciones de reutilización o reciclaje de palas de aerogeneradores. Además, tanto la industria eólica española como la europea se comprometen a poder reutilizar, reciclar o recuperar el 100% de las palas de los aerogeneradores para 2025, evitando su disposición final en vertederos. [4]

Con este compromiso, no solo se pretende reducir el impacto ambiental en el sector eólico, sino también fomentar la transición hacia un modelo circular, impulsar la innovación en el ámbito de las energías renovables tanto en España como en otras zonas del mundo, y abordar el trilema energético, que se basa en obtener una energía segura, sostenible y asequible. [8]

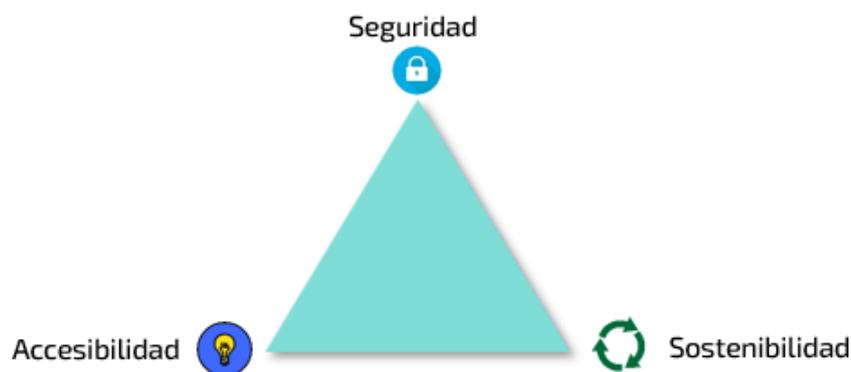


Figura 9: Trilema energético

2.2. Análisis de Ciclo de Vida

2.2.1. Introducción

El término Análisis de Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment, LCA) surge en Estados Unidos en la década de 1960, debido a la preocupación por la gestión de los impactos ambientales asociados al sector eléctrico. A raíz de esto, y gracias a la fundación SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry) el interés por esta metodología aumenta, expandiéndose a otros países y utilizándose en una gran variedad de sectores. [9]

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una metodología que permite evaluar el impacto ambiental y los efectos sobre la salud humana, asociados a un producto, proceso o servicio durante su ciclo de vida completo. Este enfoque considera todas las etapas del producto, desde la extracción de materias primas hasta la gestión al final de su ciclo de vida [1].

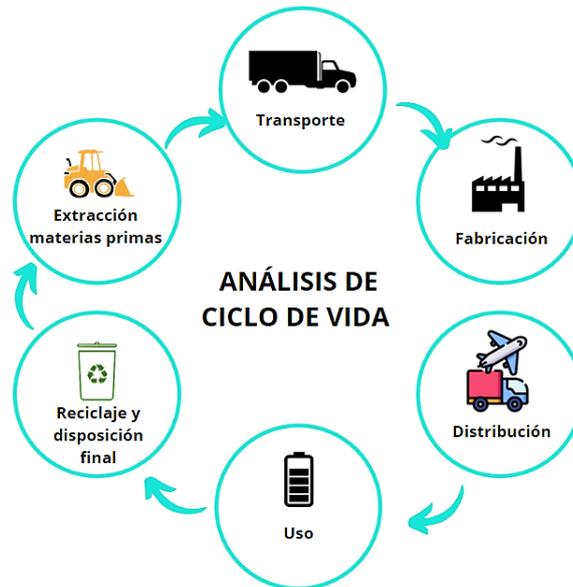


Figura 10: Etapas del ciclo de vida

El propósito fundamental de la metodología es proporcionar una visión integral de los impactos generados en todas las etapas del ciclo de vida, facilitando así la identificación de oportunidades de optimización en diversas áreas como la cadena de suministro, diseño, producción y gestión de productos.

Además, el Análisis de Ciclo de Vida desempeña un papel crucial en la transición hacia un modelo circular. La economía circular busca reducir el desperdicio y promover la reutilización, el reciclaje y la recuperación de recursos, en contraposición al modelo lineal de eliminación al final de su vida útil. [10]

Dada la creciente complejidad del Análisis de Ciclo de Vida y su importancia en la toma de decisiones ambientales y empresariales, se establece un marco regulatorio que proporciona pautas para la realización adecuada de los estudios sobre el LCA. Este marco está formado por normativas ISO, en concreto, desde la ISO 14040 a la 14043, cada una de ellas nos indica uno de los pasos a seguir para la ejecución de un Análisis de Ciclo de Vida. [11]

El Análisis de Ciclo de Vida es fundamental para abordar los desafíos ambientales asociados con productos, procesos y servicios, que impulsa una transición hacia modelos de producción y consumo más sostenibles, alineados con los principios de la economía circular.

2.2.2. Metodología

La norma ISO 14040:2006 establece un marco metodológico para la realización del Análisis de Ciclo de Vida, dividiendo el proceso en cuatro fases

principales, como se ilustra en la Figura 11. Cada una de estas es fundamental para obtener resultados precisos y confiables.

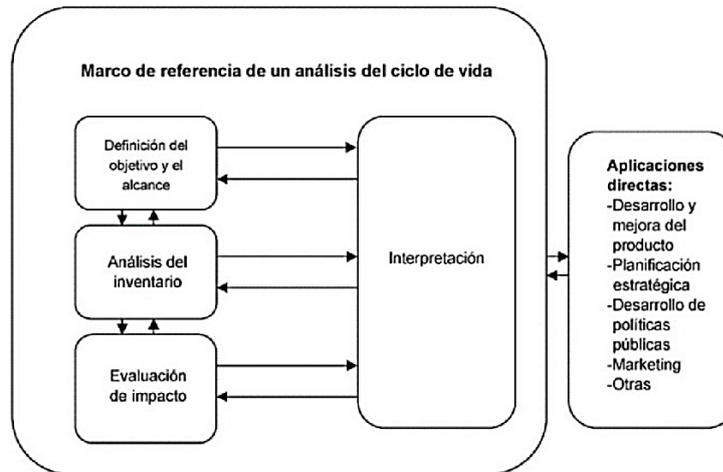


Figura 11: Fases del Análisis de Ciclo de Vida. [1]

La información relativa a las cuatro fases principales de esta metodología se obtiene de las referencias [11] y [12], salvo que se indique lo contrario.

Definición de objetivos y alcance

En esta primera fase del análisis del ciclo de vida se establecen los fundamentos esenciales para el estudio. Esto implica definir los objetivos del estudio, así como delimitar su alcance en función del nivel de detalle deseado. Los objetivos y las limitaciones deben definirse de manera clara y concisa para facilitar la recopilación de datos en la fase “Análisis de Inventario”.

El objetivo principal de nuestro estudio radica en determinar que etapas del ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores requieren de mejoras, considerando tanto los impactos ambientales como los económicos. Este enfoque tiene como finalidad facilitar la toma de decisiones de manera informada.

Para evaluar los impactos ambientales y económicos de las palas, es fundamental simular todo el ciclo de vida, incluyendo las diferentes alternativas de reciclaje presentadas en la fase de Análisis de Inventario. Esto permitirá determinar cuál es la óptima para cerrar el ciclo y contribuir a la transición hacia la economía circular.

Una vez definido el objetivo del proyecto, resulta esencial determinar la aplicación principal y las partes interesadas, también conocidas como “stakeholders”. La identificación de ambas proporciona una visión clara sobre cómo se deben presentar los resultados, cómo se van a utilizar y a quién van dirigidos.

Por otra parte, entre los aspectos clave que deben incorporarse en el alcance, se debe proporcionar una representación de sistema de las palas de los aerogeneradores, incluyendo su ciclo de vida completo, similar al que se muestra en la Figura 12.



Figura 12: Ejemplo de un plano simulado en GaBi

Además, para comprender lo que se está evaluando en el estudio y en que cantidades, se define una unidad funcional. En nuestro caso, la unidad funcional se establece como una pala de un aerogenerador, con un peso de 17750 kilogramos, una vida útil de aproximadamente veinte años y las medidas de la Figura 13.

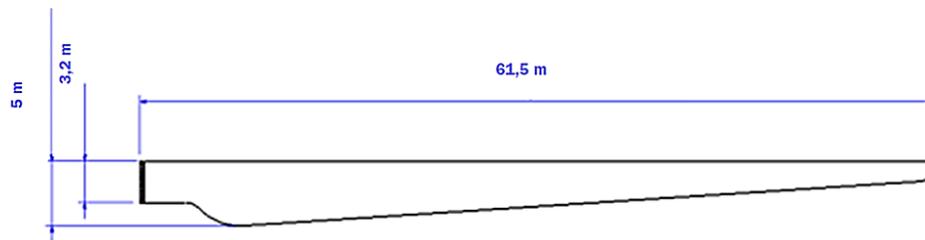


Figura 13: Medidas de una pala de aerogenerador [13]

Por último, en la fase de “Definición de objetivos y alcance” deben establecerse los límites del sistema. Esto implica determinar las etapas del ciclo de vida que se van a incluir en el análisis, elegidas en función de las necesidades específicas del estudio.

Para establecer los límites del ciclo de vida de un producto o servicio se establecen unos enfoques, cada uno de ellos con diferentes implicaciones a nivel ambiental. Estos enfoques son: [9]

- ❖ De cuna a cuna (Cradle to Cradle): Propone que los productos se diseñen para ser reciclados o reutilizados al final de su vida útil, de manera que no generen residuos e impulsando la transición hacia la economía circular.
- ❖ De cuna a tumba (Cradle to Grave): Orientado a un ciclo de vida lineal, desde la extracción de materias primas hasta la eliminación o el reciclaje al final de su vida útil.

- ❖ De puerta a puerta (Gate to Gate): Controla únicamente las actividades relacionadas con el proceso productivo de la empresa.
- ❖ De cuna a puerta (Cradle to Gate): Orientado únicamente al estudio desde la fase de extracción de materias primas hasta el fin de su producción en la fábrica

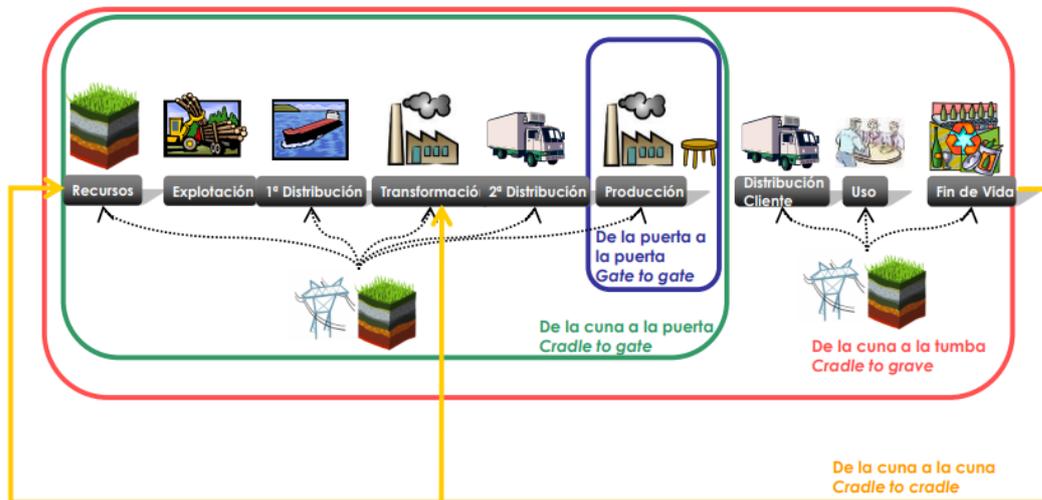


Figura 14. Enfoques de ciclo de vida [12]

Nuestra investigación sobre las palas de los aerogeneradores se ha centrado en la adopción de un enfoque de cuna a tumba. Este enfoque nos permite analizar de manera exhaustiva todas las fases del ciclo de vida de las palas, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Entre estas etapas, se engloban las alternativas de reciclaje para minimizar el impacto ambiental de las palas de los aerogeneradores.

Inventario de ciclo de vida

Durante la fase de inventario, se recopila la información necesaria para identificar y cuantificar los flujos de entrada y salida de materiales, energía y residuos asociados a cada etapa del ciclo de vida del producto, servicio o proceso. Algunos de estos flujos pueden ser emisiones de gases contaminantes, agua, residuos sólidos, ruidos, radiaciones, olores, entre otros. [11]

Para recopilar la información necesaria para llevar a cabo el análisis de inventario de nuestro trabajo, es fundamental comprender en detalle el conformado de las palas, las materias primas utilizadas, el proceso de fabricación, la vida útil del producto y las opciones de reciclaje disponibles. En nuestro caso de estudio detallamos lo siguiente: [13]

Conformado

Las palas de los aerogeneradores están constituidas por un núcleo y una cubierta o carcasa externa. El núcleo está formado por dos vigas centrales que proporcionan rigidez y resistencia para soportar esfuerzos de tensión y torsión.

Por otro lado, la cubierta externa o parte visible de la pala, está formada por dos carcasas, la superior y la inferior. Estas se moldean para dar una forma aerodinámica a la pala, permitiendo maximizar la captura de energía.

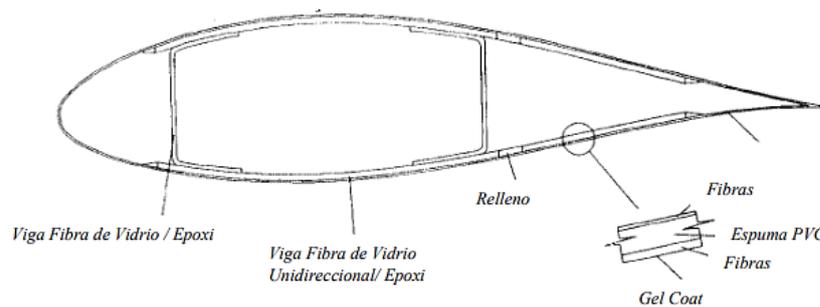


Figura 15: Estructura pala de aerogenerador [13]

Materias primas

Las palas seleccionadas para este estudio se fabrican utilizando una matriz compuesta por fibras de vidrio impregnadas en resina epoxi. Además, para la mejora de las características estructurales y el rendimiento del material compuesto, se utilizan núcleos de PVC en dicha construcción. Estos materiales permiten obtener palas ligeras, económicas y de gran tamaño.

Además de las materias primas comentadas, para la fabricación de las palas se utilizan otros materiales como adhesivos, recubrimientos superficiales, pinturas o elementos metálicos como los pararrayos.

Proceso fabricación

Las palas de los aerogeneradores se elaboran utilizando el proceso de moldeo por infusión. Este proceso se aplica tanto en las conchas como en las vigas internas que conforman la estructura de las palas. Durante este proceso, se colocan fibras de refuerzo secas sobre el molde correspondiente, asegurando una disposición precisa que garantice resistencia y durabilidad. Además, en esta etapa, se aplica un gel coat para dar a la pieza una superficie lisa.

Para facilitar la impregnación de la resina de manera uniforme por todo el material, se realiza el vacío mediante una bolsa de vacío que nos permite extraer el aire entre las capas de fibra.

Una vez compactado, se permite el paso de resina por mangueras colocadas estratégicamente a lo largo de todo el molde. Una vez que el conjunto está impregnado de resina se mantiene bajo vacío hasta que polimeriza, este proceso de curado se lleva a cabo aumentando la temperatura del molde para obtener mejores propiedades mecánicas.

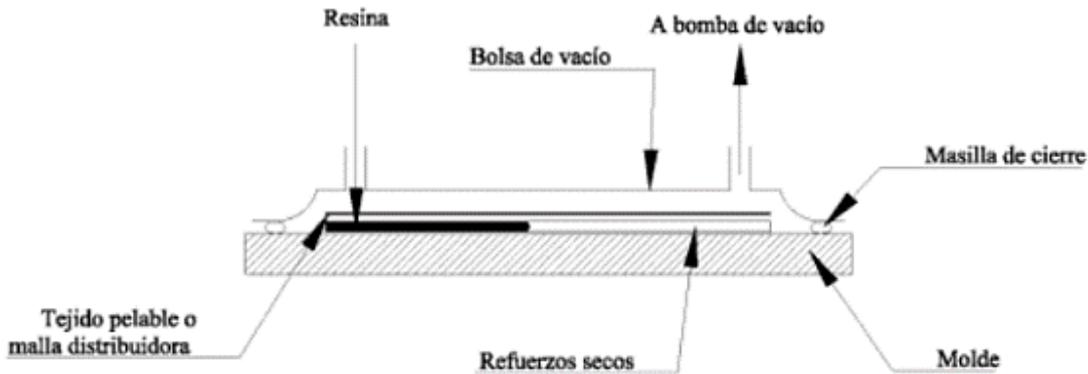


Figura 16: Moldeo por infusión [13]

Uso

En la etapa de uso de las palas de los aerogeneradores se llevan a cabo inspecciones periódicas, donde se verifica el estado de las palas y se identifican posibles desgastes. Estas inspecciones son fundamentales para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro de las palas a lo largo del tiempo. Durante estas inspecciones, se suelen realizar cambios de aceites o lubricantes, pero también pueden realizarse otros tipos de ajustes y mejoras para garantizar el rendimiento óptimo.

Transporte y distribución

Tanto en el transporte de materias primas hacia la planta de producción como en la distribución de las palas hacia los parques eólicos donde se ensamblan con los demás componentes del aerogenerador, se observa consumo de energía y posible generación de emisiones debido a los combustibles fósiles. Por lo tanto, se debe tener en cuenta la distancia recorrida en ambos casos y buscar la mejor alternativa de transporte que permita situar las palas en el lugar y momento adecuado, pero con el menor impacto ambiental y económico posible.

La fabricación de las palas de los aerogeneradores como el reciclaje de estas suponemos que se realiza en CIDAUT, Fundación para la Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía, ubicada en el Parque Tecnológico de Boecillo en la provincia de Valladolid

Reciclaje y disposición final

La etapa de reciclaje de las palas de los aerogeneradores es esencial para comprender el impacto ambiental de esta tecnología renovable. Cabe destacar la complejidad de dicha etapa, debida a la combinación de materiales como las fibras de vidrio, la resina epoxi, núcleos de PVC y distintos adhesivos en el proceso de fabricación de las palas. En esta fase, se evalúan tanto las diferentes alternativas de reciclaje como las opciones de reutilización o reúso de las palas de los aerogeneradores, buscando minimizar los impactos ambientales en la industria eólica.

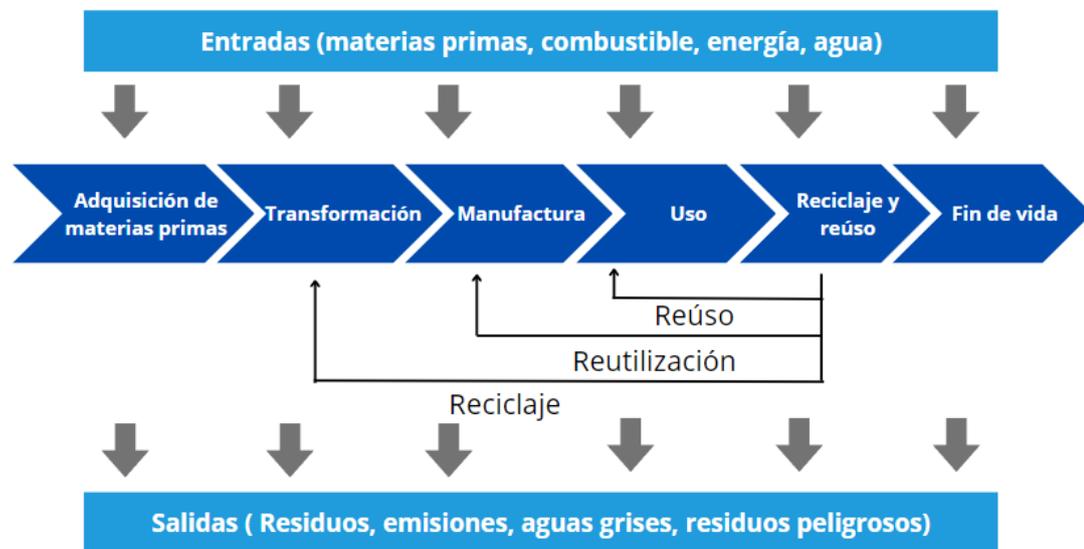


Figura 17: Reciclaje y disposición final [14]

❖ Reutilización y reúso:

Dentro de esta etapa las palas se pueden reutilizar de diferentes formas:

- Reparar y reutilizar en el mismo sector (reúso): En esta etapa, las palas de los aerogeneradores se vuelven a utilizar para su función original. Como se mencionó en el apartado 2.1, las palas elegidas tienen una vida útil estimada de 20 años, pero pueden ser sometidas a reparaciones para aumentar su vida útil hasta 10 años más o incluso ser utilizadas en un segundo mercado para su reinstalación. Sin embargo, esta opción solo alargaría el desafío de esta etapa de ciclo de vida, ya que, al finalizar ambos casos, sería necesario considerar la reutilización o reciclaje de las palas.
- Otros usos (reutilización): Las palas de los aerogeneradores se utilizan para funciones distintas a la función original para la que se diseñaron. Esta alternativa surge cuando las palas ya no pueden ser utilizadas en aerogeneradores.

Algunas de las aplicaciones de las palas de aerogeneradores desinstaladas son: [4]

- La empresa SuperUse desarrolla proyectos para reconversión de palas en parques infantiles y mobiliario urbano.



Figura 18: Reutilización de las palas en parques infantiles [15]



Figura 19: Reutilización de palas en mobiliario urbano [16]

- También se realizan proyectos como torres de transmisión de electricidad, barreras acústicas en carreteras o vías ferroviarias, marquesinas para bicicletas y techos para viviendas entre otros.



Figura 20: Marquesina para bicicletas con palas desinstaladas [17]

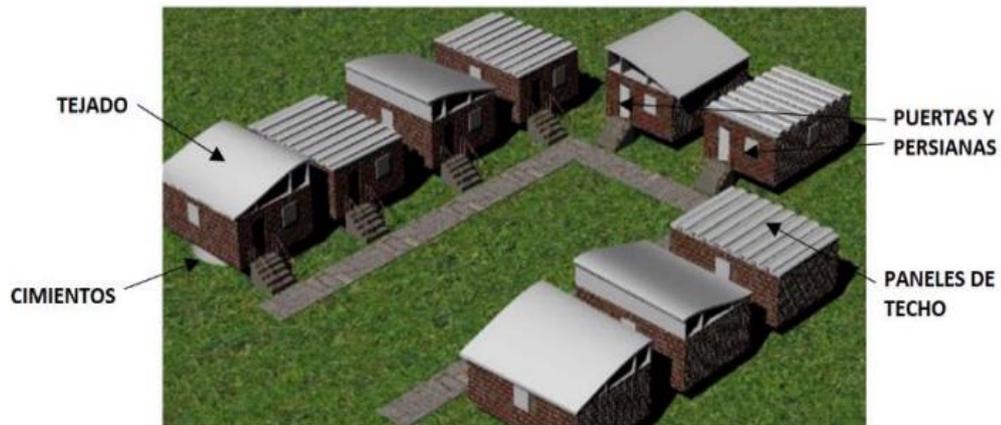


Figura 21: Techos de viviendas con palas reutilizadas [4]

❖ Reciclar:

Este proceso implica separar los materiales que componen las palas de los aerogeneradores para reintegrarlos en el proceso de producción de un mismo producto o utilizarlos para otros diferentes, contribuyendo así a la reducción de residuos y a la sostenibilidad de los recursos. [14]

En el caso del reciclaje de las palas de los aerogeneradores compuestas de fibras de vidrio y resina epoxi se suelen utilizar alternativas de reciclaje mecánico, térmico o químico como el triturado mecánico, la pirólisis o la solvólisis.

- Triturado mecánico: Los procesos de reciclaje mecánico suelen comenzar en el parque eólico, donde las palas se cortan en fragmentos con ayuda de una cortadora eléctrica, motosierra o por lanza de chorro de agua para facilitar su transporte a la planta de tratamiento. Una vez en la planta, estos fragmentos se Trituran, reduciendo su tamaño y separando con imanes los metales del resto de materiales. El triturado mecánico se caracteriza por su bajo coste y su baja energía requerida. Sin embargo, a pesar de estas ventajas, el valor del material resultante se ve reducido debido a la pérdida de propiedades mecánicas durante el proceso. El material recuperado se utiliza de relleno o como material de refuerzo en aplicaciones como, paneles sándwich o paneles de hormigón, permitiendo dar una segunda utilidad a los materiales que componen las palas. [4] y [17]

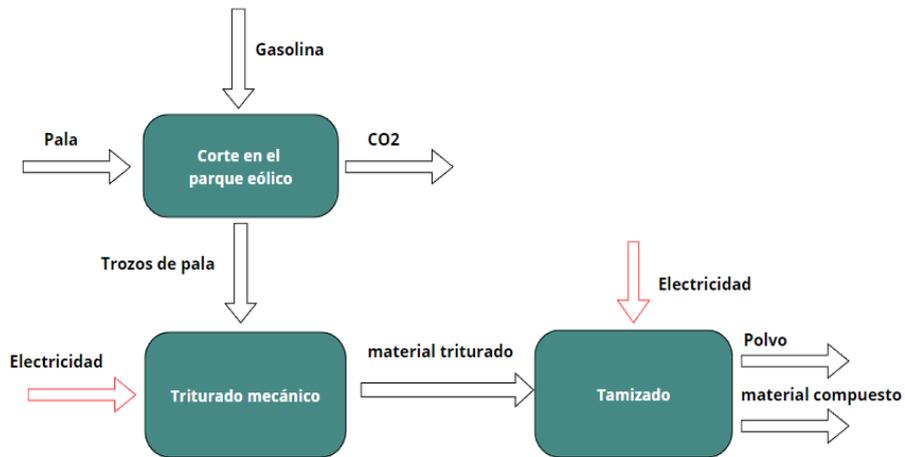


Figura 22: Proceso de reciclado mecánico

- Pirólisis: La pirólisis es un tipo de reciclaje térmico que consiste en descomponer los materiales de las palas, introduciéndolas en hornos de hasta 450 °C a 700 °C en ausencia de oxígeno. Durante este tratamiento, la matriz polimérica se descompone y se convierte en una mezcla de hidrocarburos, mientras que las fibras de vidrio se separan como producto del proceso.

Este método conlleva un coste elevado tanto en términos de inversión como de operación continua. Además, las altas temperaturas pueden dañar las fibras de vidrio, limitando su uso en aplicaciones estructurales. Algunas de las aplicaciones de las fibras de vidrio recicladas incluyen la fabricación de pegamentos, pinturas y hormigón, permitiéndonos aprovechar los materiales recuperados.

A pesar de esto, en la pirólisis se generan gases que pueden ser aprovechados como fuente de energía, lo que permite reducir los impactos ambientales y compensar parte de los costes. [4] y [17]

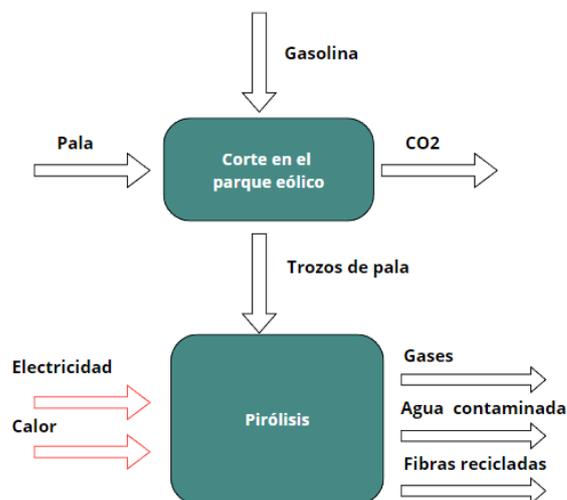


Figura 23: Proceso reciclaje térmico

- **Solvólisis:** La solvólisis se trata de un proceso químico que se utiliza para descomponer materiales poliméricos, como la resina epoxi, mediante su reacción con un disolvente. En este proceso, los enlaces químicos que mantienen unidas las moléculas de resina se rompen gracias a la acción del disolvente, lo que permite la separación de las fibras de vidrio. Los disolventes más utilizados son disolución de sosa en agua, los alcoholes y los ácidos, aunque en el caso de las palas el disolvente utilizado es el agua. Además, durante el proceso, se aplican condiciones controladas de presión y temperatura para potenciar la reacción. En comparación con otros métodos de reciclaje, este método utiliza temperaturas más bajas de trabajo lo que supone una menor pérdida de las propiedades mecánicas de las fibras de vidrio. Sin embargo, la solvólisis, al encontrarse en fase de investigación, resulta ser un proceso más costoso en términos de inversión y operación, en comparación con otros procesos. [4] y [17]

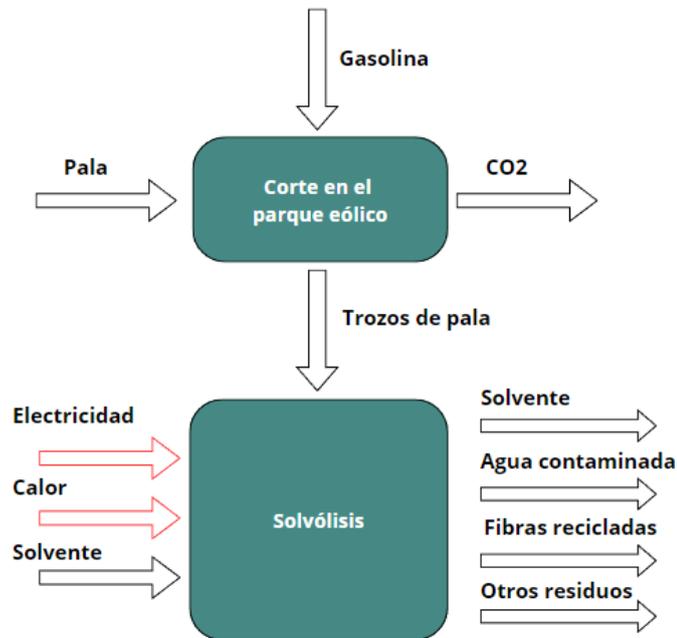


Figura 24: Proceso reciclaje químico

En el caso de no poder reusar, reutilizar o reciclar las palas de los aerogeneradores existe la posibilidad de incinerarlas obteniendo energía del proceso o directamente depositarlas en el vertedero, pero son aspectos que actualmente no se contemplan debido al impacto ambiental que estas alternativas suponen.

Una vez analizadas las etapas del ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores, cabe destacar la importancia de la precisión y exactitud de

los datos recopilados en cada una de las etapas para garantizar la validez y fiabilidad de los resultados del análisis en su conjunto.

Evaluación del impacto del ciclo de vida

En la etapa de evaluación se analizan los posibles impactos relacionados con los flujos de entrada y de salida identificados en la etapa anterior. El propósito fundamental de esta etapa es comprender como los distintos flujos afectan a la sociedad, al medioambiente e incluso a la economía, durante el ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores. Este análisis nos permite identificar áreas críticas y oportunidades de mejora para maximizar el beneficio ambiental.

Para llevar a cabo una correcta evaluación de los efectos sobre el bienestar social y la sostenibilidad ambiental, se recurre a diferentes métodos de evaluación de ciclo de vida. Entre ellos, se encuentran RECIPE, Ecoinvent, CIM y TRACI, cada uno de ellos con enfoques diferentes y herramientas específicas que nos permiten analizar los impactos generados a lo largo del ciclo de vida del producto.

Para la evaluación de impactos ambientales de las palas de los aerogeneradores, seleccionamos el método ReCIPE debido a su amplia gama de categorías de impacto ambiental que permiten cuantificar los efectos de las palas a lo largo de su ciclo de vida y obtener información útil para decisiones sostenibles.

Independientemente del método escogido, es fundamental seguir la siguiente estructura:

❖ Seleccionar categorías de impacto, indicadores y modelos asociados:

En primer lugar, se deben definir las categorías de impacto en las que se agrupan los indicadores. Estas pueden describir los impactos en diferentes niveles:

- Los endpoints representan las categorías de impacto ambiental finales un análisis de ciclo de vida, representando los resultados directos y abarcando la totalidad de los impactos de un producto, proceso o actividad. Estas categorías finales proporcionan una visión global y completa de los efectos ambientales derivados del producto evaluado. [11] En el caso del método ReCIPE, los endpoints incluidos abarcan los daños a la salud humana, a la biodiversidad y a la disponibilidad de recursos, como se muestra en la Figura 25. Los endpoints se obtienen de la agrupación de midpoints relacionados.

- Los midpoints, por otro lado, son indicadores o categorías de impacto intermedias que se sitúan en la etapa intermedia del análisis del ciclo de vida. Estos indicadores ofrecen una visión detallada de los impactos ambientales en puntos concretos del LCA. [11] Entre los midpoints comunes se encuentran la eutrofización, la acidificación o el cambio climático, entre otros. En el método ReCIPe, se identifican una totalidad de 18 midpoints, los cuales contribuyen a la evaluación de los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores y también se pueden observar en la Figura 25.

La diversidad de categorías nos proporciona una visión detallada de los impactos ambientales asociados con las palas de los aerogeneradores en cada etapa de su ciclo de vida, permitiendo la toma de decisiones informadas y buscando otras alternativas que proporcionen una transición hacia la economía circular. Enfoque fundamental para promover prácticas industriales más sostenibles y reducir el impacto ambiental en la generación de le energía eólica.

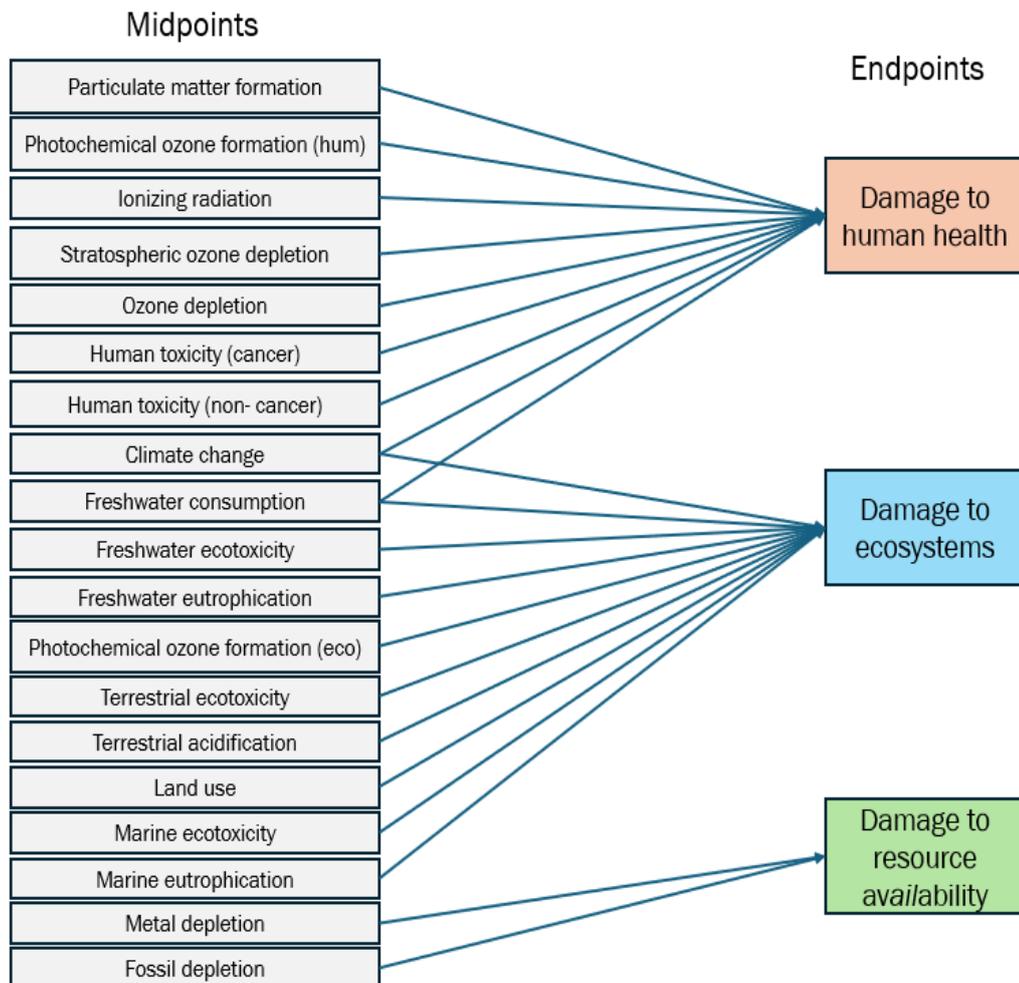


Figura 25: Esquema de relación entre impactos de efectos intermedios y efectos finales

❖ Clasificar los resultados del inventario de análisis de ciclo de vida

En esta fase es esencial asignar los datos identificados en el inventario a la categoría de impacto correspondiente. Este proceso nos permite analizar los impactos ambientales producidos a lo largo del ciclo de vida y con ello, identificar zonas críticas. [11]

❖ Cálculo de valores de los indicadores (Caracterización)

La caracterización implica tomar una carga ambiental o emisión como unidad de referencia y expresar las demás en función de esta.

Por ejemplo, en el caso de la acidificación, tomamos como referencia el SO₂, y se expresan las demás en función de esta, expresando todas las sustancias en kg de SO₂ equivalente. [9]

De manera adicional se pueden realizar los siguientes pasos: [9]

- Normalizar: Fijar una unidad común para los indicadores de tal forma que se facilite la comparación y evaluación de diferentes alternativas. Se puede realizar en términos de gases de efecto invernadero por unidad de producción, permitiendo compararlos según su nivel de producción.
- Agrupación: Clasificar y organizar los indicadores en grupos para simplificar el análisis y facilitar la interpretación de resultados. A estos grupos se les llama endpoints.
- Ponderación: Asignar valores relativos a los diferentes impactos para reflejar su importancia en el análisis. Esto permite otorgar mayor peso a los impactos considerados más significativos.
- Análisis de calidad de datos: Nos permite evaluar si los datos utilizados en nuestro estudio son precisos, fiables y consistentes.

Interpretación de resultados

Finalmente, se analizan e interpretan los resultados del análisis de ciclo de vida. Esto implica un examen detallado de los datos para identificar las principales áreas o puntos que conllevan mayor impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida del producto evaluado. Además, se comparan diferentes opciones y se evalúan las posibles estrategias de mejora para aumentar la sostenibilidad del producto. Entre ellas nos podemos encontrar con el desarrollo de tecnologías más eficientes, optimización del proceso o búsqueda de otras alternativas de materiales o de formas de reciclaje.

Es importante destacar la importancia de verificar la integridad, sostenibilidad y consistencia del análisis para garantizar la fiabilidad de las conclusiones que se obtienen, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones.

Una vez completada la interpretación de los resultados, se realiza un informe detallado que incluye las conclusiones y las recomendaciones para mejorar la sostenibilidad del producto.

2.2.3. Software de Análisis de Ciclo de Vida

Hoy hay muchos programas relacionados con el cálculo de impactos ambientales que incluyen herramientas para cubrir estudios de Análisis de Coste de Ciclo de Vida. La mayoría de ellos incluyen bases de datos ambientales tanto educativas como profesionales de pago, que facilitan la realización de los estudios. [18]

Estos programas nos permiten obtener resultados sobre diversas categorías de impacto. Para alcanzar estos resultados, debemos realizar el modelo de ciclo de vida e introducir los datos que configuren nuestro inventario. [11]

Entre los programas más conocidos nos encontramos con SimaPro, OpenLCA y GaBi. [18] Para nuestro estudio sobre las palas de los aerogeneradores, hemos seleccionado el software GaBi, escogido por ser uno de los softwares más avanzados a nivel mundial en análisis de ciclo de vida, además de ser el software proporcionado por CIDAUT. Este destaca por su capacidad para crear modelos complejos y evaluar los impactos ambientales. Con el software GaBi, podemos analizar todas las etapas de ciclo de vida, incluyendo la extracción de materias primas, transporte, producción e incluso formas de reciclaje determinadas.

Este software permite diseñar planos en los que se conectan los diversos procesos, ya sean procesos preexistentes en la base de datos o creados por el propio usuario. Cada uno de estos procesos incluye flujos de entrada y salida, que también pueden ser definidos por el usuario.

Para comprender su funcionamiento, en la Figura 26, se muestra el plano de modelado del ciclo de vida de un clip de acero. En este modelo se pueden identificar varios procesos, como el de fabricación del tocho de acero (“Steel Billet”) y el de producción del alambre de acero (“Steel wire rod”), ambos disponibles en la base de datos gratuita del programa.

Es importante destacar que todos los procesos deben incluir, al menos, un flujo de entrada y un flujo de salida. Además, estos flujos son esenciales para la correcta representación y conexión de los diferentes procesos dentro del plano.

Análisis de ciclo de vida y costes de las palas de los aerogeneradores: Comparación de alternativas de reciclaje

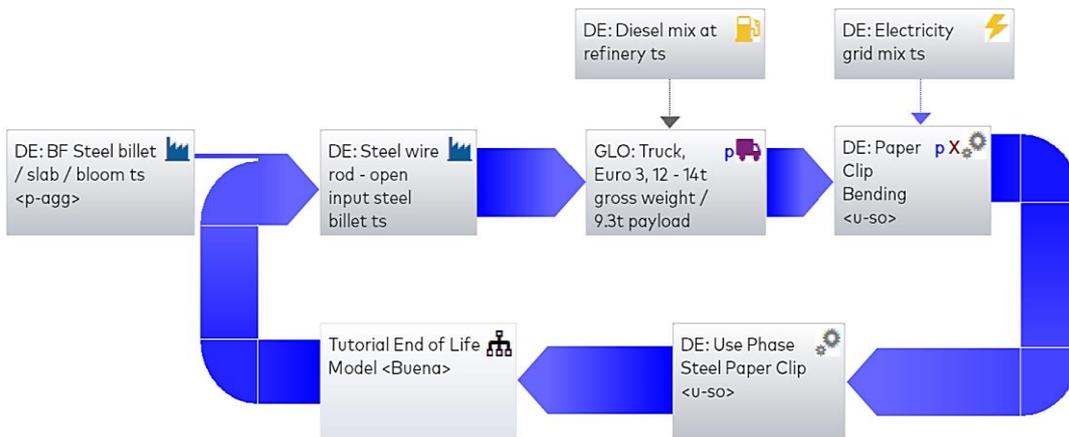


Figura 26: Plano modelado clip de acero [Tutorial de GaBi]

Una vez modelado el ciclo de vida completo del clip de acero, se obtienen los impactos ambientales de todas sus etapas. En la Figura 27 se obtiene los impactos que genera cada etapa en la categoría de cambio climático.

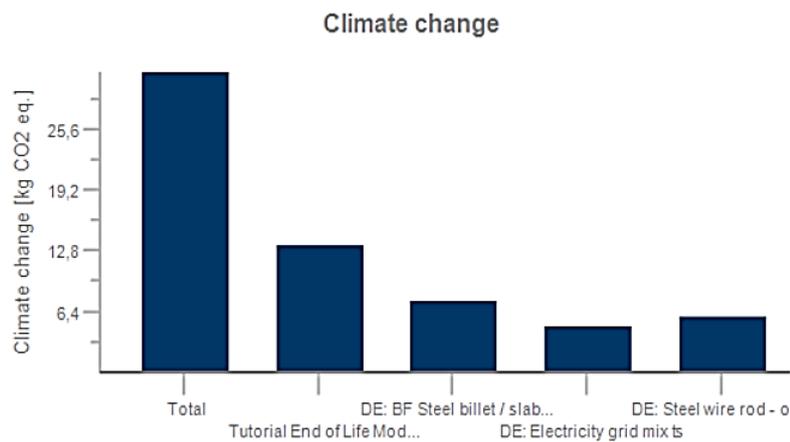


Figura 27: Resultado clip de acero [Tutorial GaBi]

3. SIMULACIÓN EN GABI

El análisis de ciclo de vida es una herramienta fundamental para evaluar los impactos ambientales de productos y procesos a lo largo de su vida útil. En este estudio, se aborda el modelado del ciclo de vida de una pala de aerogenerador utilizando el programa GaBi.

GaBi es un software especializado en análisis de ciclo de vida (ACV), desarrollado por Sphera, empresa enfocada en la gestión de riesgos y en la sostenibilidad. Este programa permite evaluar los impactos ambientales de productos, procesos y servicios a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Además, es esencial para empresas que buscan optimizar sus actividades y reducir el impacto ambiental.

El proceso de modelado de ciclo de vida de las palas incluye varias etapas, cada una de las cuales contribuye a una comprensión integral de los impactos generados permitiendo identificar área de mejora. Estas etapas se detallan a continuación:

3.1 Etapas

Cabe destacar que los datos necesarios para obtener las cantidades de entrada y de salida de los diferentes procesos de este capítulo se obtienen de la referencia [13] y de ensayos de infusión de resina realizados en CIDAUT, a menos que se especifique otra fuente.

3.3.1. Extracción materias primas.

Las partes que componen nuestra pala se pueden simplificar en dos componentes fundamentales: las vigas internas, que juegan un papel fundamental en la integridad estructural, y las carcasas superior e inferior, que forman la estructura externa de la pala.

Ambos componentes están formados por fibras de vidrio, resina epoxi y un núcleo de PVC (Policloruro de vinilo), cada uno aportando propiedades específicas que mejoran el rendimiento y durabilidad del material compuesto. El volumen total de las materias primas utilizadas en la pala es de $9,5 \text{ m}^3$, de los cuales el 3% va dedicado al PVC [19]. El resto se distribuye en la misma proporción entre las fibras de vidrio y para la resina epoxi. Sabiendo que la densidad de la fibra de vidrio es de 2540 kg/m^3 , la de la resina es de 1123 kg/m^3 y la del PVC es de 250 kg/m^3 [20], la cantidad en peso de cada una de las materias primas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Materias primas totales

Materias primas	Densidad (kg/m^3)	Volumen (m^3)	Masa (kg)
Fibra de vidrio	2540	4,6	11684
Resina epoxi	1123	4,6	5166
PVC	250	0,285	71

Una vez determinado el peso total de las materias primas, asignamos las siguientes proporciones: el 30% para cada una de las carcasas, el 22,5% para la viga I y el 17,5% para la viga II. Cabe destacar que las vigas se diferencian únicamente en su longitud, siendo de 58 metros para la viga I y 45 metros para la viga II, por lo que el peso de esta última será menor. Con estas proporciones, obtenemos las cantidades específicas de materias primas para cada componente (Tabla 2), lo que nos permitirá modelarlos de forma individual y con mayor precisión.

Tabla 2: Cantidad materias primas por componente

	Viga I	Viga II	Carcasa Superior	Carcasa inferior
Fibra de vidrio (kg)	2631	2041	3505	3505
Resina epoxi (kg)	1163	903	1550	1550
PVC (kg)	16	13	21	21

La base de datos de la versión educacional de GaBi incluye el proceso de obtención de estas materias primas, como se muestra en Figura 28. Esta base de datos proporciona una representación detallada de los flujos de entrada y de salida asociados a cada uno de los procesos, permitiendo una evaluación exhaustiva de la etapa de extracción de materias primas.

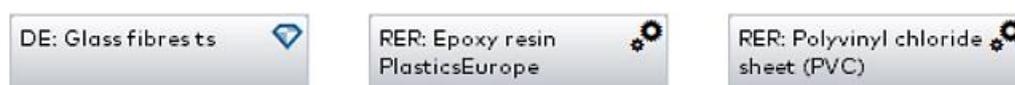


Figura 28: Procesos de obtención de materias primas en GaBi

Estos procesos incluyen flujos de entrada y salida ya definidos, como se puede ver en el ejemplo de la Figura 29 y Figura 30 sobre la obtención del PVC.

Flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad
Air [Renewable resources]	Mass	0,43	kg
Bauxite [Non renewable resources]	Mass	6,78E-006	kg
Bentonite [Non renewable resources]	Mass	2,56E-005	kg
Biomass (solid) [Biomass fuels]	Mass	0,00915	kg
Carcass meal [Hazardous waste for recovery]	Mass	9,13E-012	kg
Chromium [Non renewable elements]	Mass	1,06E-006	kg
Clay [Non renewable resources]	Mass	1,84E-006	kg
Copper [Non renewable elements]	Mass	9,68E-005	kg
Crude oil (in kg) [Crude oil (resource)]	Mass	0,5	kg
Dolomite [Non renewable resources]	Mass	1,09E-005	kg
Energy (recovered) [Thermal energy]	Energy (net)	-0,777	MJ
Feldspar (aluminium silicates) [Non renewable resources]	Mass	4,95E-017	kg
Ferro manganese [Non renewable resources]	Mass	8,11E-007	kg
Fluorspar (calcium fluoride; fluorite) [Non renewable resources]	Mass	2,1E-006	kg

Figura 29: Ejemplo de algunos de los flujos de entrada del proceso de obtención del PVC

PFlujo	Magnitud	Cantidad	Unidad
Aluminium [Inorganic emissions to fresh water]	Mass	1,56E-005	kg
Ammonia [Inorganic emissions to air]	Mass	0,000866	kg
Ammonium / ammonia [Inorganic emissions to fresh water]	Mass	0,00128	kg
Antimony [Heavy metals to air]	Mass	1,63E-010	kg
Arsenic (+V) [Heavy metals to fresh water]	Mass	1,87E-008	kg
Arsenic (+V) [Heavy metals to air]	Mass	2,87E-007	kg
Benzene [Hydrocarbons to fresh water]	Mass	4,43E-012	kg
Benzene [Group NMVOC to air]	Mass	1,56E-010	kg
Biological oxygen demand (BOD) [Analytical measures to fresh water]	Mass	0,0101	kg
Bromate [Inorganic emissions to fresh water]	Mass	2,97E-005	kg
Cadmium [Heavy metals to air]	Mass	8,82E-008	kg
Cadmium [Heavy metals to fresh water]	Mass	7,06E-010	kg

Figura 30: Ejemplo de algunos de los flujos de salida del proceso de obtención del PVC

Para evaluar el impacto ambiental de todas las materias primas utilizadas, se ha creado un plano en GaBi en el que se representan todas las materias primas con sus respectivos transportes hasta la fábrica.

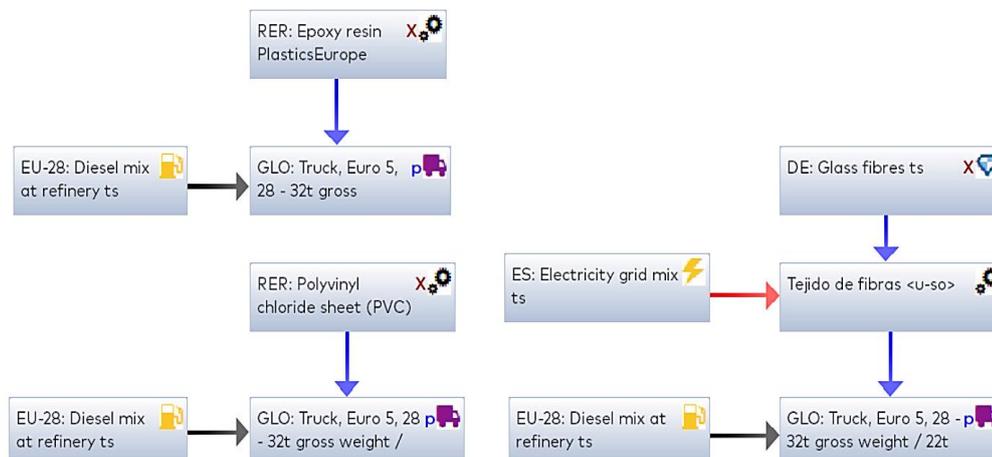


Figura 31: Esquema conjunto de la obtención y transporte de materias primas en GaBi

Además, es importante tener en cuenta que el proceso “Glass Fibres” proporcionado por el software produce las fibras de vidrio en forma de hilos. En consecuencia, en la planta en la que se fabrican los hilos, se realiza el proceso de tejido, representado en el software como “Tejido de fibras”, para suministrar a las empresas la fibra ya tejida.

3.3.2. Fabricaciones materiales auxiliares

En la fabricación de las palas de los aerogeneradores, se recurre a materiales auxiliares que aseguran la calidad de las piezas resultantes en procesos clave como el moldeo por infusión, el ensamblaje o el acabado entre otros.

Antes del moldeo por infusión, el molde debe prepararse adecuadamente. Para ello, se utiliza un agente desmoldeante y un gel coat. El agente desmoldeante es una sustancia que facilita la separación de la pieza final del molde, evitando que se peguen los materiales compuestos al molde durante el proceso de curado. Se aplican aproximadamente 15 gramos por cada m^2 llegando a utilizar aproximadamente 16 kg del desmoldeante LOCTITE FREKOTE 700-NC.

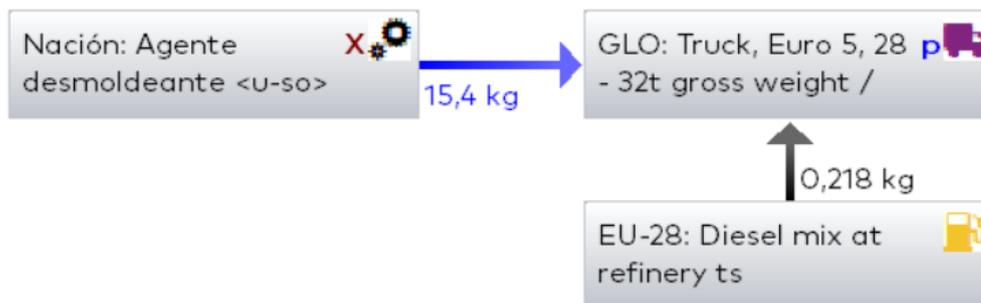


Figura 32: Esquema de fabricación y transporte del agente desmoldeante en GaBi

Por otro lado, el gel coat, en nuestro caso RESOLTECH 7090, proporciona una mayor durabilidad de la pala y solo se aplica en el molde de la carcasa superior e inferior. Se utilizan 175 litros de este gel, distribuidos en un 50% para cada molde.

En el proceso de moldeo por infusión, utilizado para la fabricación de los componentes de la pala, se utilizan los siguientes materiales auxiliares:

- ❖ Moldes de los componentes: Suponemos que están compuestos por 50% resina y 50% fibra de vidrio, dan forma a cada uno de los componentes de las palas. El peso de los moldes está reflejado en la Tabla 4.
- ❖ Bolsa de vacío: Sella el laminado de los materiales compuestos y del resto de materiales utilizados en la infusión. Permite eliminar el aire

entre las capas y asegura una compactación adecuada, eliminando espacios vacíos.

- ❖ Peel ply: También llamada tela de desprendimiento es una tela de plástico que facilita el desmoldeo de la pieza final, proporcionando una su proporcionando una superficie que simplifica la eliminación de material auxiliar tras el curado.
- ❖ Flow media: Es una tela de polietileno que garantiza una distribución uniforme de la resina durante el proceso de infusión, asegurando una impregnación completa de la resina. También conocida como malla de sangrado.
- ❖ Cinta adhesiva para juntas: Conocida como “Chicle”, está hecha de polipropileno y permite un sellado hermético de la bolsa de vacío, evitando el desprendimiento de la resina en las áreas donde las capas se unen. Esto ayuda a mantener la integridad de la pieza al prevenir que se separe la fibra de la resina.

Tanto el proceso de fabricación de la bolsa de vacío como el de la tela de desprendimiento no se encuentran definidos en el software, por lo que es necesario modelarlos. Ambos materiales se fabrican a partir de láminas de plástico, tal como se muestra en la Figura 33. Estos materiales siguen una proporción en peso 1:1 con respecto al plástico utilizado para su producción.

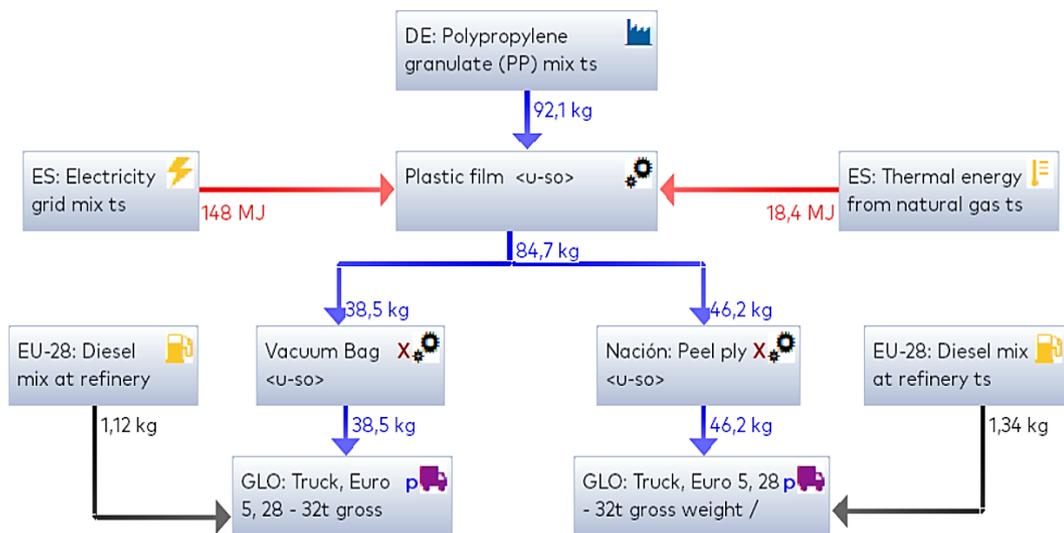


Figura 33: Esquema de fabricación bolsa de vacío y Peel Ply en GaBi

Además, la fabricación de las láminas de plástico también debe simularse en el programa, utilizando como materia prima el polipropileno granulado. Se consideran tanto el consumo de electricidad como de energía térmica requeridos para obtener el producto final, así como las posibles pérdidas durante el proceso.

Tabla 3: Cantidades materiales auxiliares para cada componente

Componentes	Bolsa de vacío (kg)	Peel Ply (kg)	Sellador (kg)	Medio de flujo (kg)
Viga I	8,7	10,4	12,1	83,3
Viga II	6,7	8,1	9,4	64,6
Carcasa superior	11,6	13,9	16,2	111,0
Carcasa inferior	11,6	13,9	16,2	111,0

Los moldes de las carcasas pesan 12000 kg respectivamente. Por lo tanto, a partir de este dato y haciendo la proporción con el peso final de cada componente, se obtiene el peso de los demás moldes.

Tabla 4: Peso de los moldes

Molde material compuesto	Peso molde (kg)
Viga I	9000
Viga II	7000
Carcasa superior	12000
Carcasa inferior	12000

Una vez acabado el proceso de infusión, el molde debe limpiarse para la fabricación de la siguiente pala. La limpieza se realiza de forma manual con disolvente, aplicando aproximadamente 0,5 litros para cada 10 m² de superficie a limpiar. Una vez el molde está limpio, se puede volver a utilizar para fabricar otra pala.

Por otro lado, en el proceso de ensamblaje de los componentes de la pala, también explicado en el apartado de fabricación, se utiliza:

- ❖ Adhesivo: La versión educacional de GaBi no dispone de un adhesivo para nuestra fase de ensamblaje, por lo tanto, debemos crear el proceso de fabricación de este. En nuestro caso, hemos elegido el adhesivo RESOLTECH 3350 XT, compuesto de resina epoxi y caucho como

endurecedor. Estos componentes se encuentran en una proporción en peso de 100:45 [21]. Además, para la realización de nuestra pala se necesitan 725 kg de este adhesivo. Por lo tanto, tendremos 500 kg de resina epoxi y 225 de endurecedor.

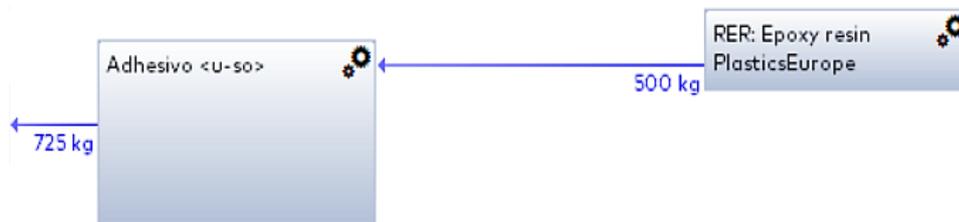


Figura 34: Esquema de fabricación del adhesivo en GaBi

Por último, en la etapa de acabado de la pala del aerogenerador, antes de ser enviada al parque eólico, se coloca el pararrayos:

- ❖ Pararrayos: La pala cuenta con un aparato que permite controlar el punto de los rayos, evitando que impacten en zonas no deseadas. Este dispositivo se instala durante el proceso de acabado de la pala. Está hecho de acero y pesa 4 kg [22]. El acero del que se conforma el pararrayos no está disponible en el software es por ello por lo que lo reemplazamos por el acero inoxidable 304 con propiedades mecánicas similares.

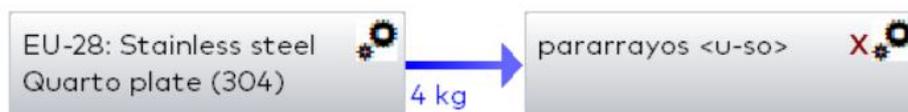


Figura 35: Esquema de fabricación del pararrayos en GaBi

Al igual que con las materias primas, se elabora un plano auxiliar que incluye todos los materiales auxiliares utilizados en la fabricación de las palas a excepción de los moldes que se incluyen en un plano llamado utillaje.

3.3.3. Procesos de fabricación

A lo largo de la etapa de fabricación, se emplean diversos procesos para alcanzar el resultado final de la pala.

En primer lugar, las fibras de vidrio, ya tejidas y transportadas hasta la fábrica en rollos, se cortan en la forma y tamaño necesarios para la elaboración del producto final con una máquina de corte de hoja rotativa que requiere de energía eléctrica para su funcionamiento, como la que se muestra en la Figura 36 [23]



Figura 36: Máquina de corte Gerber Technology Z1 [23]

Durante el proceso de corte, se registra una pérdida aproximada del 20% de la fibra de vidrio que se convierte en residuo y se recicla posteriormente. Esta pérdida debe tenerse en cuenta para calcular la cantidad inicial de fibra de vidrio, de modo que el valor de la fibra de vidrio a la entrada del proceso de infusión sea el marcado en la Tabla 2.



Figura 37: Esquema de pretratamiento fibras de vidrio en GaBi

Por otro lado, la resina que llega a la fábrica se debe mantener en condiciones adecuadas para su utilización en la fabricación de las carcasas y las vigas. Por ello, se crea el proceso que requiere de suministro de electricidad para evitar la degradación y asegurar que se mantengan las propiedades de la resina.



Figura 38: Esquema de preparación resina epoxi en GaBi

Además, es necesario preparar cada uno de los moldes utilizados en la fabricación de las palas. En el caso de los moldes de las vigas, el proceso de preparación consiste en aplicar una capa de desmoldeante. Este crea una barrera entre el molde y la pieza, facilitando el desmoldeo una vez que las piezas han curado. Por otro lado, los moldes destinados a la fabricación de las carcasas requieren además de una capa de gel coat. Esta capa, además de permitir el desmoldeo, proporciona un acabado de alta calidad a la superficie de las carcasas.

El proceso de aplicación del desmoldeante se realiza de forma manual y no requiere de consumo de energía, sin embargo, para la aplicación del gel coat se utilizan máquinas:

- Potencia de la maquina: 2,2 kW
- Son necesarios dos equipos de inyectado
- Tiempo de inyección de adhesivo: 30 minutos cada equipo

$$\text{Energía (MJ)} = \frac{30 \text{ kW} \times 570 \text{ minutos}}{60} \times 3,6 \text{ MJ} / \text{kWxh} = 1026 \text{ MJ}$$

Después del proceso de preparación de las fibras de vidrio, estas entran al proceso de preforma, donde se colocan en una disposición específica y se las da una forma preliminar que sirve como base para el proceso de infusión de resina. Una vez obtenida la forma preliminar, se realiza un nuevo corte, esta vez con máquina láser, logrando un corte preciso y de alta calidad de las fibras de vidrio. Durante el corte con láser se pierde aproximadamente el 5% de la fibra de vidrio que también se recicla posteriormente.

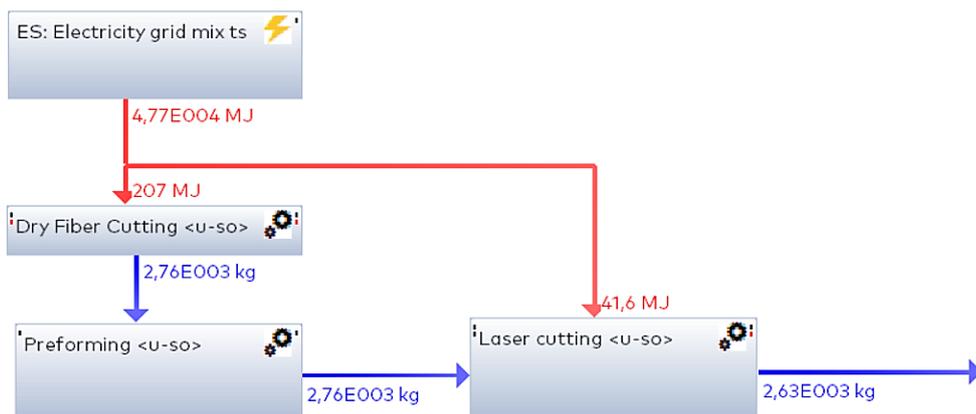


Figura 39: Esquema procesos de preforma y corte por láser en GaBi

Cuando los materiales ya se han preparado, se realiza el lay-up de infusión en el cual se colocan las capas preformadas de fibra de vidrio y el núcleo de PVC. En esta etapa también se coloca el peel ply, la bolsa de vacío, la tela de

polietileno y los distintos adhesivos, permitiendo que el molde con las capas ya colocadas para entrar al proceso de infusión.



Figura 40: Proceso de lay-up para una placa de material compuesto [24]

En el proceso de infusión, se realiza el vacío y se procede a inyectar la resina. De este proceso salen los componentes de las palas ya curados, a la espera de ser ensamblados. Además, todos los materiales auxiliares, a excepción del molde, se consideran residuo al finalizar el proceso. En el caso del molde, se establece el proceso de limpieza y, una vez limpiado, se volverá a utilizar. Para no contabilizar su impacto debido a su reiterado uso, se establece una entrada positiva y una negativa, anulando dicho flujo.

Con este último proceso se completa la fabricación de los distintos componentes de la pala. Por ello, se realiza un plano para cada componente ya que para cada uno de ellos entra una cantidad de materias primas y materiales auxiliares diferentes. El plano referente a cada uno de los componentes viene reflejado en el Anexo I: **Simulación de los componentes en GaBi**.

Una vez producidos cada uno de los componentes de las palas, el siguiente paso es el proceso de ensamblaje. Este proceso consiste en unir con adhesivo epoxi los componentes para formar la estructura completa de la pala. La aplicación de este adhesivo se realiza con una máquina por lo que necesitamos suministrar energía al proceso, obtenida a partir del tiempo que tarda en aplicarse el adhesivo y la potencia de la máquina.

- Potencia de la maquina: 11 kW
- Son necesarios dos equipos de inyectado
- Tiempo de inyección de adhesivo: 30 minutos cada equipo

$$\text{Energía (MJ)} = \frac{11\text{kW} \times 30 \text{ minutos} \times 2}{60} \times 3,6 \text{ MJ} / \text{kW} \times \text{h} = 39,6 \text{ MJ}$$

La energía calculada hasta ahora es la necesaria para aplicar 456 litros, pero en total se aplican 662 litros. Por lo tanto, la energía necesaria para aplicar estos 662 litros es de 57,6 MJ.

Con esta información podemos modelar este proceso, obteniendo el esquema a continuación:

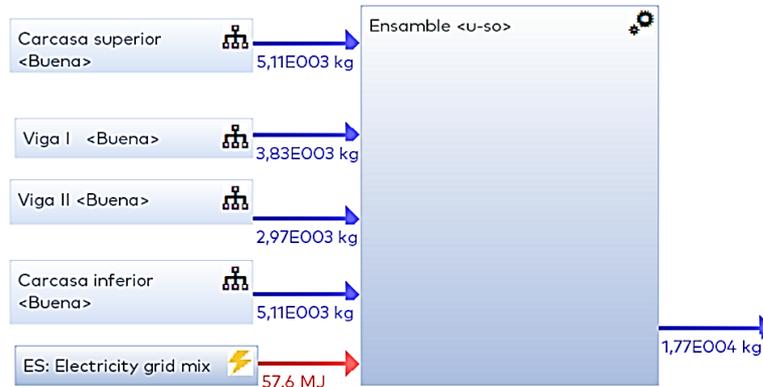


Figura 41: Esquema de proceso de ensamblaje en GaBi

Después del ensamblaje se pasan a hacer los agujeros axiales y radiales para unir la pala a los demás componentes, así como el refrentado de la cara de apoyo. Para calcular la energía utilizada en este proceso, tenemos en cuenta los siguientes tiempos:

- Tiempo mecanizado de los agujeros: 270 minutos
- Tiempo de refrentado. 45 minutos
- Potencia de la máquina: 30 kW

$$Energía (MJ) = \frac{30 \text{ kW} \times 315 \text{ minutos}}{60} \times 3,6 \text{ MJ} / \text{kWxh} = 567 \text{ MJ}$$

La última etapa de fabricación de la pala antes de ser enviada al parque eólico es el acabado de esta. En esta se realiza el lijado y pulido de la pala del aerogenerador, además de colocar el pararrayos. Para calcular la energía utilizada realizamos lo siguiente:

- Tiempo repelado perimetral: 30 minutos
- Tiempo acabado borde de ataque: 120 minutos
- Tiempo acabado borde salida: 120 minutos
- Tiempo acabado superficial: 300 minutos
- Potencia máquina: 30 kW

$$\text{Energía (MJ)} = \frac{30 \text{ kW} \times 570 \text{ minutos}}{60} \times 3,6 \text{ MJ} / \text{kWh} = 1026 \text{ MJ}$$

Es importante destacar que tanto en el mecanizado como en el acabado suponemos que no se pierde peso de la pala. Además, al igual que para las materias primas y los materiales auxiliares, se crea un plano con todos los procesos utilizados para construir la pala del aerogenerador.

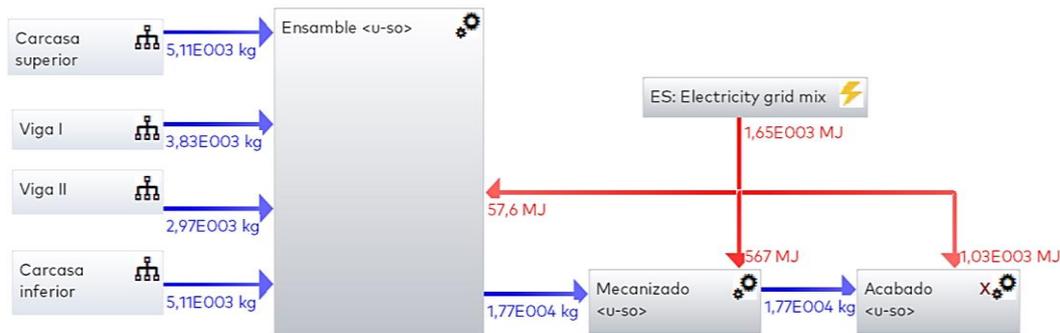


Figura 42: Esquema de etapa de fabricación en GaBi

3.3.4. Transporte

La fabricación de palas supone una compleja cadena de suministro que abarca desde la adquisición de materias primas hasta la entrega de las palas terminadas en el parque eólico y su posterior reciclaje o desecho.

Cabe destacar que todos los camiones utilizados en el transporte de materias primas y materiales auxiliares tienen una capacidad útil de 22 toneladas ya que los transportes de largas distancias suelen realizarse en camiones de grandes dimensiones.

La fibra de vidrio se transporta desde una de las plantas de 3B Fibreglass ubicada en Bélgica [25] por lo que el camión recorre aproximadamente 1464 kilómetros hasta llegar a CIDAUT. Es importante planificar de forma adecuada la frecuencia de estos envíos para no generar costes y retrasos innecesarios.

Por otro lado, la resina epoxi, otra de las materias primas principales, es producida por Sicomin, con fábrica ubicada en Châteauneuf-les-Martigues, Francia [26]. La distancia recorrida para el traslado del camión es de aproximadamente 1200 kilómetros.

La espuma de PVC del fabricante Diab, utilizada también para fabricar los componentes de las palas, se transporta desde Longarone, Italia [27]. Los camiones que transportan este material recorren unos 1899 kilómetros. A pesar del bajo peso de PVC necesario para realizar una pala, los camiones

pueden transportar otros materiales para nuestra empresa o para otras, por lo que el consumo se reparte entre toda la mercancía transportada.

Además del suministro de materias primas, también se necesitan materiales auxiliares como bolsas de vacío, peel ply y películas de polietileno, que se obtienen de Airtech en Luxemburgo [28]. La distancia de transporte es aproximadamente 1400 kilómetros.

Tanto el gel coat RESOLCOAT 7090 como el adhesivo RESOLTECH 3350 XT son transportados desde Francia en camiones de 22 toneladas. Por otro lado, el agente desmoldeante proviene de la fábrica de Henkel en Barcelona y los moldes para los componentes de las palas son proporcionados por Gurit y se transportan desde Dinamarca [29] en camiones especializados, aunque en nuestro caso supondremos los mismos camiones que para el transporte de materias primas y auxiliares.

Además, el transporte de disolvente PYMA para la limpieza de los moldes se realiza también desde una tienda de Barcelona, garantizando su disponibilidad continua.

Una vez fabricadas, las palas de los aerogeneradores deben ser transportadas desde CIDAUT hasta el parque eólico. Este trayecto depende de la ubicación específica del parque eólico, en nuestro caso, situado en el municipio de Castellanos de Castro y Sasamón, en la provincia de Burgos, ubicado a 126 km del Parque tecnológico Boecillo y con una potencia instalada de 46,4 MW [30]. El transporte de estas se realiza en camiones especializados, pero en nuestro caso suponemos camiones de una capacidad de 17,7 toneladas, modificado en los ajustes de un camión de 22 toneladas.

Por último, al final de su vida útil, las palas de los aerogeneradores deben ser transportadas desde el parque eólico a una planta de reciclaje. En este caso, suponemos que CIDAUT dispone de una planta de reciclaje para estas, es por ello por lo que el camión volverá a recorrer otros 126 km hasta el Parque Tecnológico de Boecillo.

Cabe destacar la importancia de una planificación y coordinación eficiente que permita optimizar los costes y minimizar el impacto ambiental. Por este motivo, asumimos que estos camiones están operando a plena capacidad para minimizar tanto costes como impactos ambientales.

3.3.5. Reciclaje y reutilización

En el análisis de ciclo de vida de la pala de aerogenerador, se ha incluido un modelado detallado de las distintas alternativas de reciclaje de las palas. En nuestro caso, el reciclaje de la pala comienza en el parque eólico, donde las

palas se cortan con la cortadora de mano Husqvarna K770. Esta cortadora se acciona con gasolina, y al contrario que las cortadoras eléctricas, nos permite desplazarnos con facilidad a lo largo de la pala. Aunque hoy en día también se realizan cortes por agua a presión.

Para calcular la cantidad de gasolina utilizada se realiza lo siguiente: [31]

- 1 litro de gasolina son 9,6 kWh
- 30% eficiencia
- Suponemos que se tarda 6 horas en cortar la pala entera
- 3,7 kW de potencia

$$\text{Cantidad gasolina} = \frac{3,7}{0,3 \times 9,6} \times 6 = 7,68 \text{ litros}$$

Además, la máquina emite $711 \text{ g}/\text{kWh}$ de CO_2 , por lo que se establece la cantidad emitida en nuestro proceso. [31]

Este primer corte se realiza para facilitar su transporte a la planta de reciclaje. Una vez allí, se utiliza la alternativa de reciclaje seleccionada, ya sea reciclado mecánico, pirólisis o solvólisis. Sin embargo, estas alternativas reducen las propiedades mecánicas de las fibras obtenidas, haciendo que estas sean inutilizables para la construcción de una nueva pala. Las alternativas de reciclaje modeladas son las siguientes:

- ❖ Triturado mecánico: En este proceso, las secciones de pala transportadas desde el parque eólico se introducen en una trituradora para reducir aún más su tamaño. Posteriormente, se utiliza una máquina de tamizado para separar y recuperar los materiales valiosos de los residuos compuestos.
 - Consumo de energía eléctrica del proceso de triturado para el caso de FRP: 0,31 MJ/kg [32]
 - Consumo de la energía eléctrica del tamiz: 0,05 MJ/kg [33]

De este tamizado se obtiene polvo y material triturado compuesto de fibra de vidrio y resina epoxi que será utilizado posteriormente de relleno en carreteras y cimentaciones.

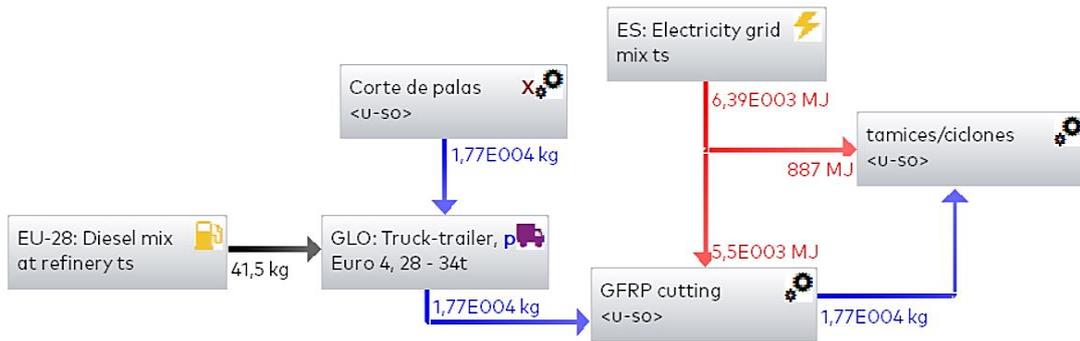


Figura 43: Esquema etapa de reciclaje mecánico en GaBi

- ❖ **Pirólisis:** Proceso de reciclaje que supone un gran consumo de energía térmica y eléctrica. A este proceso, se introducen los residuos de plástico reforzado con fibra de vidrio previamente cortados en el parque eólico y se obtiene como flujo de salida el 70% de fibras recicladas. Sin embargo, también se generan emisiones y subproductos, como propano, metano, etano, entre otros, agua contaminada y residuos peligrosos.

Cabe destacar que estos subproductos se pueden reciclar usándose como combustible o en otras aplicaciones, proporcionando una fuente de energía adicional y contribuyendo a la reducción de residuos. [4] Sin embargo, en este proyecto no se considera como se reciclan, solo se considera que estos subproductos no generan emisiones al aire.

- Consumo total de energía: 24-30 MJ/kg [32]

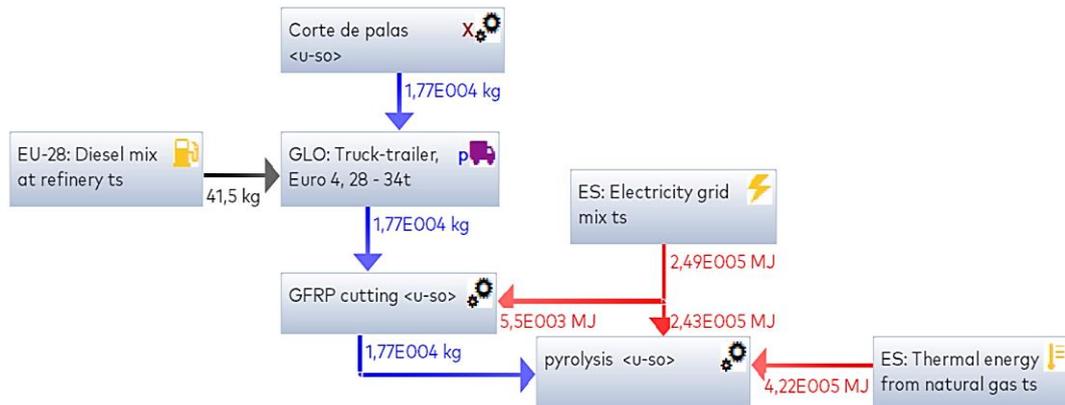


Figura 44: Esquema etapa de reciclaje térmico en GaBi

- ❖ **Solvólisis:** En este proceso se utilizan disolventes y catalizadores específicos para descomponer los residuos de materiales compuestos. En particular, se utilizan 0,131 kg de catalizador (hidróxido de potasio) y 4,37 kg de disolvente (agua) por cada kg de plástico reforzado de fibra de vidrio introducido al proceso de reciclaje. [34]

Como resultado, se obtienen fibras de vidrio recicladas, además de emisiones y otros residuos adicionales. Este método permite recuperar materiales valiosos, aunque también generan subproductos que deben gestionarse adecuadamente.

- Consumo total de energía: 20-91 MJ/kg [32]
- Consumo de energía eléctrica: 13,7 MJ/Kg
- Consumo de energía térmica: 60 MJ/kg

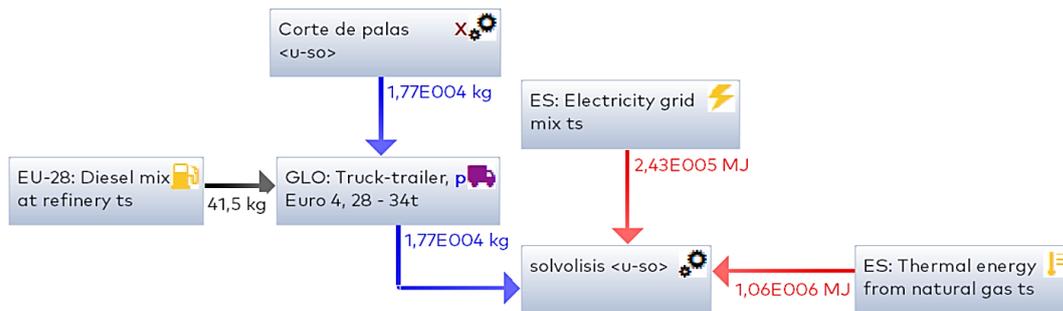


Figura 45: Esquema etapa de reciclaje químico en GaBi

Por otro lado, en el programa se implementa el proceso de reutilización, considerando que la pala puede ser usada de nuevo con algunas reparaciones despreciadas en la simulación. Una vez transcurridos los años de reuso, la pala será reciclada, pero este proceso no está incluido en el alcance de este trabajo.



Figura 46: Esquema etapa de reuso en GaBi

3.3.6. Fin de vida

Finalmente, para cerrar el ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores, es necesario abordar el destino de las fibras recicladas. La opción ideal sería su reutilización en la fabricación de nuevas palas. Sin embargo, debido a la pérdida de propiedades mecánicas, [4] esta alternativa no es viable en la actualidad. En el caso del triturado mecánico se obtiene material compuesto triturado que se utiliza como relleno en cimentaciones y carreteras. En cambio, en el reciclado térmico y químico, se obtiene fibra reciclada separada de la resina, la cual se utiliza para aplicaciones que no requieran tanta exigencia en las propiedades mecánicas.

Además, los gases que se producen en el pirólisis también se reutilizan como combustibles. En este proyecto, no se considera la segunda vida de estos combustibles, pero se tiene en cuenta que no generan impacto negativo porque serán reciclados, aunque no sea alcance de nuestro proyecto.

Por otro lado, para obtener los resultados por etapas, se realizan planos para cada una de estas etapas del ciclo de vida. Cabe destacar que el transporte de las materias primas, de los materiales auxiliares y del utillaje se incorpora dentro de los respectivos planos. Además, el transporte de la pala cortada desde el parque eólico hasta CIDAUT viene incluido en el plano de reciclaje correspondiente (pirólisis, triturado mecánico o solvólisis)

Los planos correspondientes al ciclo de vida completo de las palas de aerogenerador en función del tipo de reciclaje se encuentran en el

4. COSTES

Además de evaluar el impacto ambiental generado en cada etapa del ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores, también analizamos los costes asociados a cada una de estas etapas. A este tipo de análisis se le llama análisis de coste de ciclo de vida (LCC, Life Cycle Cost), y nos permite tener una visión a largo plazo y detallada de los costes en todas las etapas del ciclo de vida del producto. Cabe mencionar que esta metodología se encuentra en pleno desarrollo, lo que limita su alcance y puede presentar desafíos en su implementación.

El software GaBi ya cuenta con una sección para la realización de este tipo de análisis, aunque debido a la falta de una base de datos que nos permita realizar el análisis sin complicaciones se ha optado por realizarlo siguiendo la metodología explicada en este capítulo.

EL LCC nos permite obtener el coste en las diferentes etapas del ciclo de vida, por lo tanto, el coste obtenido al final del análisis será la suma del coste de obtención de materias primas, materiales auxiliares, utillaje y maquinaria, el coste de mano de obra, energía, transporte y tratamiento de residuos. [35]

El coste de las materias primas se calcula teniendo en cuenta la cantidad de materia prima suministrada al proceso (C), la tasa de pérdida de material en el proceso (P), la tasa de piezas defectuosas (D) y el coste unitario de materia prima, obteniendo la siguiente fórmula:

$$\text{Coste materias primas} = \frac{C}{(1-P)(1-D)} \times \text{precio} \quad [35]$$

Consideramos que, dado el gran tamaño de las palas, es poco probable que haya palas defectuosas, por lo tanto, la tasa de piezas defectuosas (D) será nula. Además, la tasa de pérdidas a lo largo del proceso también es aproximadamente cero para la resina y el PVC. En cambio, en los procesos de corte de fibra de vidrio se pierde aproximadamente el 25%.

Tabla 5: Coste materias primas [36]

Materias primas	C (kg)	P	Coste unitario (€/kg)	Coste total (€)
Fibra de vidrio	15.330	0,25	1,65	33.726
Resina epoxi	5.164	0	16	82.624
PVC	71,5	0	0,56	40

Por lo tanto, el coste total de materias primas para una pala de aerogenerador es aproximadamente de 116.400€.

Por otro lado, el cálculo del coste de las materias auxiliares se realiza de la misma manera, pero considerando que no hay pérdidas durante su uso en la fabricación de la pala.

Tabla 6: Coste de los materiales auxiliares [37], [38], [39] y [40]

Materias auxiliares	C (kg)	Coste unitario (€/lote)	Lotes	Coste total (€)
Bolsa de vacío	38,5	561	2	1.123
Peel ply	46,2	296	4	1.182
Malla de sangrado	369,6	2,8	2200	6.083
Chicle	60	161	4	645
Agente desmoldeante	15.4	250	5	1.252
Gel coat	197	990	7	6.926
Adhesivo	725	983	20	19.660
Disolvente	31,5	48	2	96
Pararrayos	4	1.420	1	1.420

Además de estos costes de materiales auxiliares, tenemos que añadir la gasolina necesaria para cortar las palas una vez finalizada su vida útil y los disolventes para el reciclaje por solvólisis. Los litros de gasolina necesarios para cortar una pala son 8 litros por lo que el coste que esto supone, si el precio medio de la gasolina es de 1,6 €/litro, es de 13 €. Por otro lado, se usan 83 m³ de agua que supone un coste aproximado de 66 € y 2250 kg de hidróxido de potasio que supone aproximadamente 2050 €. [41]

Las cantidades sobrantes de los pedidos realizados por lotes se almacenan y se utilizan para la siguiente pala. A pesar de esto, imputo los costes de estos lotes a una única pala. Por esta razón, el coste total de los materiales auxiliares es aproximadamente de 38.390 €.

Cada año, en la fábrica se produce una cantidad determinada de palas de aerogenerador. Para calcular los costes asociados a los moldes de las carcasas y de las vigas, suponemos que el número de palas realizadas este año es de 8.725 [42]. Además, consideramos que los moldes tienen una vida útil de 3 años y, por lo tanto, han de amortizarse en ese periodo. Así, el coste imputado a una pala se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Coste por pala} = \frac{\text{Coste del molde}}{\text{amortización} \times \text{número palas}}$$

Para llevar a cabo los cálculos, se consideran los siguientes datos:

- Coste molde carcasa superior e inferior: 1M € [13]
- Coste molde viga I: 250.000 € [13]
- Coste molde viga II: 200.000 € [13]
- Amortización lineal: 3 años
- Número de palas año 1: 8.725 palas

Suponemos que los moldes se han comprado este año y, por lo tanto, calculamos el coste por pala a partir de la amortización del primer año.

Tabla 7: Amortización de los moldes (primer año)

Moldes	Amortización anual (€)
Carcasas	333.000
Viga I	83.300
Viga II	66.700

Por lo tanto, la amortización de los moldes para cada pala es de 55 € durante el primer año.

Para asignar los costes de la maquinaria a una de las palas, se sigue el mismo procedimiento. La maquinaria se amortiza a 10 años a excepción de la maquinaria utilizada en la etapa de reciclaje cuya vida útil es de 15 años. Además, se considera que en la planta se reciclan aproximadamente 200 palas al año.

Tabla 8: Coste maquinaria imputado a cada pala [13]

Máquina	Valor inicial (€)	Amortización anual (€)	Coste por pala (€)
Aplicación gel coat	128000	12800	1,5
Corte	125.000	12.500	1,4
Corte laser	200.000	20.000	2,3
Infusión	455.000	45.500	5,2
Aplicación del adhesivo	217.000	21.700	2,5
Mecanizado	855.000	85.500	9,8
Acabado	100.000	10.000	1,2
Cortadora a mano	1.300	87	0,4
Trituradora	260.000	17.300	86,5
Tamiz	20.000	1.300	6,5
Reactor pirólisis	300.000	20.000	100
Reactor solvólisis	400.000	27.000	135

Por lo tanto, los costes totales de maquinaria por pala en la etapa de producción son de 24 € por pala, mientras que los que los costes por

maquinaria para el reciclado son 93 € para el reciclaje mecánico, 100 € para el térmico y 135 € para el químico.

Los costes de mano de obra directa son aquellos costes relacionados con la actividad productiva, como los salarios de los trabajadores de la línea de producción y se imputan directamente al producto fabricado, en nuestro caso a la pala.

Para facilitar el cálculo de los costes de mano de obra directa realizamos una media del salario bruto de los trabajadores en la línea de producción. Suponiendo que el sueldo bruto medio es de 43,000 € y que las horas trabajadas son 1920, el coste medio por hora es de 23 €.

Además, en la Tabla 9 aparecen los costes de mano de obra englobados, teniendo en cuenta que algunos procesos se realizan para los cuatro componentes de la pala.

Tabla 9: Costes de mano de obra directa [13]

Proceso	Horas dedicadas	Coste mano obra directa (€)
Semi-finished dry fabric	12	276
Dry fabric cutting	9	207
Preforming	14	322
Laser cutting	6	128
Resin storing	0	0
Vacuum Infusion	42,5	978
aplicación agente desmoldeante	9	207
aplicación gel coat	6	138
limpieza	9	207
Lay up	125	2.875
Ensamble	22	506
Mecanizado	12,5	287,5
Acabado	96	2208
Corte de las palas	6	138
Triturado	0,5	11,5
Tamizado	0,5	11,5
Pirólisis	0,5	11,5
Solvólisis	18	414

Los procesos de reciclado se realizan con grandes máquinas que requieren de personas que preparen los equipos y en algunos casos, supervisen el proceso. En el caso del triturado, tamizado y la pirólisis, se supone un tiempo de preparación de media hora y únicamente se requiere de una persona. En cambio, en el proceso de solvólisis se requiere de una persona durante todo el proceso. Por lo tanto, suponiendo que el reactor industrial procese una tonelada la hora, el tiempo de duración del proceso es de 18 horas.

Por lo tanto, el coste de mano de obra directa es aproximadamente de 8.600 € para fabricar una pala de aerogenerador completa y reciclarla por triturado mecánico, 8.590 € reciclándola por pirólisis y 8.990 € reciclándola por solvólisis.

En el Análisis de Ciclo de Vida también se calculan los costes de energía de los procesos. Para ello, se debe conocer la potencia consumida por las máquinas utilizadas en cada proceso y el tiempo que dura la operación, además del precio unitario de la electricidad, el cual varía en función del día y de la franja horaria. Por lo tanto, se toma como referencia el precio medio a lo largo del año, que hasta ahora es de 0,113 €/kWh. Además, el proceso de lay-up, el de limpieza y el de aplicación del agente desmoldeante se realizan manualmente, sin utilización de máquinas que requieran consumo de energía.

Tabla 10: Coste de electricidad de cada proceso

Proceso	Electricidad (kWh)	Coste total de la electricidad (€)
Tejido de fibras	317	36
Dry fabric cutting	256	29
Preforma	0	0
Laser cutting	51	6
Resin storing	4.878	551
Vacuum Infusion	53.700	6.068
aplicación desmoldeante	0	0
aplicación gel coat	2,2	0,25
Limpieza	0	0
Lay up	0	0
Ensamble	16	2
Mecanizado	158	18
Acabado	285	32

El coste total de la electricidad en la etapa de fabricación es de 6.742 €. Aunque este coste no representa el gasto total de electricidad, también debemos considerar el coste de electricidad consumida durante la etapa de

reciclaje. Dependiendo del proceso de reciclaje escogido, tanto el consumo como el coste de la electricidad varía considerablemente.

Tabla 11: Coste consumo eléctrico en el triturado mecánico

Proceso	Energía eléctrica (kWh)	Coste total
Triturado en la planta de reciclado	1.528	173
Tamizado	247	28

Tabla 12: Coste consumo eléctrico pirólisis

Proceso	Energía eléctrica (kWh)	Coste total
Pirólisis	67.547	7.633

Tabla 13: Coste consumo eléctrico solvólisis

Proceso	Energía eléctrica (kWh)	Coste total
Solvólisis	67.547	7.633

El proceso de pirólisis y solvólisis consumen la misma cantidad de energía eléctrica pero estos procesos, al contrario que el triturado mecánico, también suponen consumo de energía térmica. El coste unitario del gas natural para una empresa con grandes consumos (TUR 3) es de 0,04 €/kWh. [43]

Tabla 14: Costes consumo de energía térmica de los reciclados

Proceso	Energía térmica (kWh)	Coste total (€)
Pirólisis	117.345	4.694
Solvólisis	295.827	11.833

Por último, se evalúan los costes incurridos en el transporte de las materias primas, los materiales auxiliares, el utillaje, la pala ya fabricada hasta el parque eólico y la pala cortada una vez finalizada su vida útil, excluyendo de este cálculo el transporte de la maquinaria, suponiendo que estas ya se encuentran en la fábrica.

El coste de transporte se calcula a partir del precio unitario de transporte y de la distancia recorrida. Cada camión puede transportar mercancía de diferentes empresas, y el precio unitario es el mismo independientemente de las toneladas de material de tu empresa que haya en el camión. Por ello, como empresa, es conveniente que el transporte se realice con el camión lleno y el

material sobrante se almacene para realizar otra pala. Además, el precio unitario de transporte es aproximadamente de 2,3 €/km dato aportado por CIDAUT.

Por lo tanto, suponiendo un coste de 2,3 €/km para los camiones de 22 toneladas, el coste del transporte de las materias primas y de los materiales auxiliares para una pala se calcula teniendo en cuenta la proporción de esas 22 toneladas que se utiliza para cada pala.

Tabla 15: Coste de transporte de materias primas

Transporte	Distancia (km)	Coste (€)
Fibra de vidrio	1464	2450
Resina epoxi	1200	648
PVC	1899	14,2

Tabla 16: Coste de transporte materiales auxiliares

Transporte	Distancia (km)	Coste (€)
Bolsa de vacío	1400	6
Peel ply	1400	7
Malla de sangrado	1400	54
Agente desmoldeante	684	1
Gel coat	1090	22
Silicona	1400	9
Disolvente	684	2
Adhesivo	1090	83

El coste de transporte de los moldes se imputa a cada una de las palas fabricadas con esos moldes. Al tener una vida útil de 3 años, el coste del

transporte de los moldes para cada se puede despreciar ya que tiene un valor insignificante.

Por otro lado, calculamos el coste del transporte de la pala al parque eólico y del parque eólico a la planta de tratamiento:

Tabla 17: Costes de transporte final

Transporte	Distancia (km)	Coste (€)
Pala fabricada	126	290
Residuo de pala	126	290

Por lo tanto, el coste del transporte en nuestro caso de estudio es de 3.876 €, englobando todos los transportes necesarios.

Es importante saber que los costes asociados a un proceso productivo disminuyen a medida que aumenta la cantidad producida, lo cual se presenta en la llamada curva de aprendizaje. Esta curva se estabiliza cuando el trabajador está totalmente cualificado para realizar el proceso de forma optimizada. Sin embargo, nuestra fábrica ya produce 8.725 palas por lo que los costes ya se han estabilizado.

Una vez calculados los costes imputables al producto fabricado y posteriormente reciclado por una de las alternativas; se calcula el coste indirecto; asociado al alquiler de la fábrica, luz de vestuarios, salarios de personal de oficina, entre otros. Los costes indirectos suelen representar una menor proporción del total de los costes generales, por lo que estimamos que estos costes son del 30%.

Tabla 18: Costes directos e indirectos globales

Caso	Costes directos (€)	Costes indirectos (€)
Fabricación y reciclaje mecánico	174.382	74.735
Fabricación y reciclaje térmico	186.504	79.930
Fabricación y reciclaje químico	194.080	83.177

En resumen, el análisis de ciclo de vida (LCC) de una pala de aerogenerador tiene en cuenta múltiples factores y etapas, desde la adquisición de materias primas hasta el reciclaje final. Este análisis nos permite comprender mejor el impacto económico de cada etapa, obteniendo las etapas con mayores costes y pudiendo tomar decisiones informadas para reducir esos costes.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

5.1 Análisis de impacto económico

En el capítulo anterior nos apoyabamos en la metodología de Análisis de Costes de Ciclo de Vida (LCC) para calcular el impacto económico a lo largo del ciclo de vida completo de las palas de los aerogeneradores. En este capítulo se evalúan los resultados obtenidos con el fin de tomar decisiones informadas.

A continuación, se presentan los costes asociados a las etapas de obtención de materias primas y materiales auxiliares así como los costes de la etapa de fabricación, ya que los costes de la etapa de reciclaje depende el tipo de alternativa de reciclaje elegida.

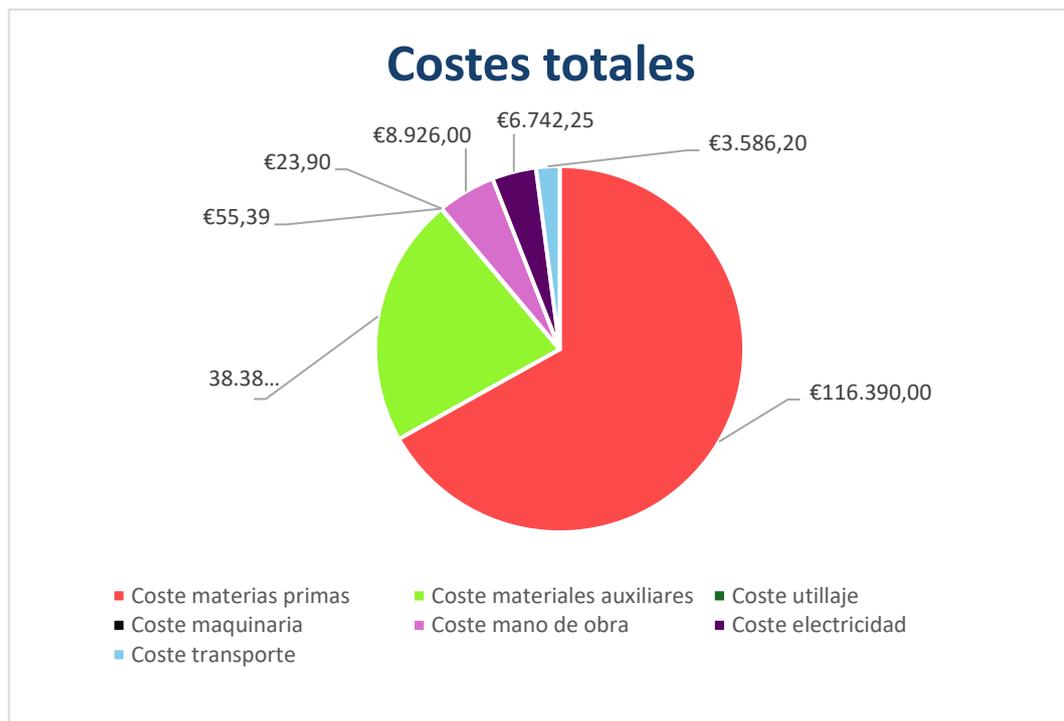


Figura 47: Costes de obtención de materiales y de fabricación de la pala

Como se puede observar en el gráfico, los costes de obtención de materias primas, junto con los materiales auxiliares, representan el mayor coste. Esto se debe a que se requieren grandes cantidades de material para construir palas de esta longitud. Por otro lado, los costes de maquinaria y los costes de utillaje imputados a una pala son los más bajos, ya que están amortizados a un número considerable de palas al año.

El coste de energía es considerable debido a la gran cantidad de energía requerida en los procesos de fabricación, especialmente en el proceso de infusión donde se incluye la energía de las bombas de vacío, de las máquinas de inyección de resina y de los moldes para realizar el curado de resina.

Además, los costes de transporte se consideran eficientes, ya que los camiones están optimizados para llevar la máxima cantidad disponible. Esto significa que el coste por kilometro se amortiza al distribuirse entre varias palas.

Por otro lado, para analizar los costes incurridos en la etapa de reciclaje en función de la alternativa escogida, se realiza la siguiente gráfica:



Figura 48: Costes de reciclaje

En esta gráfica se incluyen todos los costes incurridos en el reciclaje; desde las máquinas necesarias (Reactores, motosierras, tamizadoras o trituradores) hasta la energía consumida durante el proceso, incluyendo también la mano de obra necesaria y el transporte de la pala a la planta de reciclado.

Con esto, el método de reciclaje menos costoso es el triturado mecánico, aunque los materiales obtenidos solo son adecuados para ser utilizados como relleno. Sin embargo, la pirólisis tiene un costo intermedio, pero permite obtener fibras recicladas separadas que aunque no puedan reincorporarse al proceso de fabricación de las palas se pueden utilizar en otros componentes que no requieran de tantos requisitos técnicos. Por último, la solvólisis es el proceso de reciclaje más costoso debido a la energía requerida en el proceso y la necesidad de disolventes que ayuden a separar los materiales.

5.2 Análisis impactos ambientales

5.2.1. Análisis de impactos ambientales por midpoints

Una vez realizada la simulación con el software GaBi, se obtienen resultados en 18 midpoints o categorías de impacto intermedias vistas en el capítulo 2. A diferencia de las categorías de impacto finales (Salud humana, escasez de recursos y calidad del ecosistema), estas categorías intermedias proporcionan datos detallados sobre los diferentes impactos. Las categorías finales, sin embargo, están diseñadas para ofrecer una visión simplificada y comprensible para aquellos que no están familiarizados con los detalles más técnicos.

Todas las categorías de impacto son importantes para el análisis de ciclo de vida. Sin embargo, dependiendo del enfoque específico del estudio, algunas categorías pueden tener mayor prioridad que otras. En este estudio, tan solo se van a evaluar las siguientes categorías de impacto:

Cambio climático

En primer lugar, se evalúa el impacto de las palas de los aerogeneradores sobre el cambio climático a lo largo de su ciclo de vida, medido en términos de kg de CO_2 . Esta categoría es especialmente importante hoy en día debido a la necesidad urgente de reducir las emisiones para cumplir con los objetivos establecidos en acuerdos internacionales como el Acuerdo de París, que busca limitar el aumento de temperatura global. [44] Además, se considera esta categoría debido a su alta magnitud de impacto y a los fenómenos adversos que genera, como fenómenos meteorológicos extremos y las subidas del nivel del mar, que afectan a todos los ecosistemas.

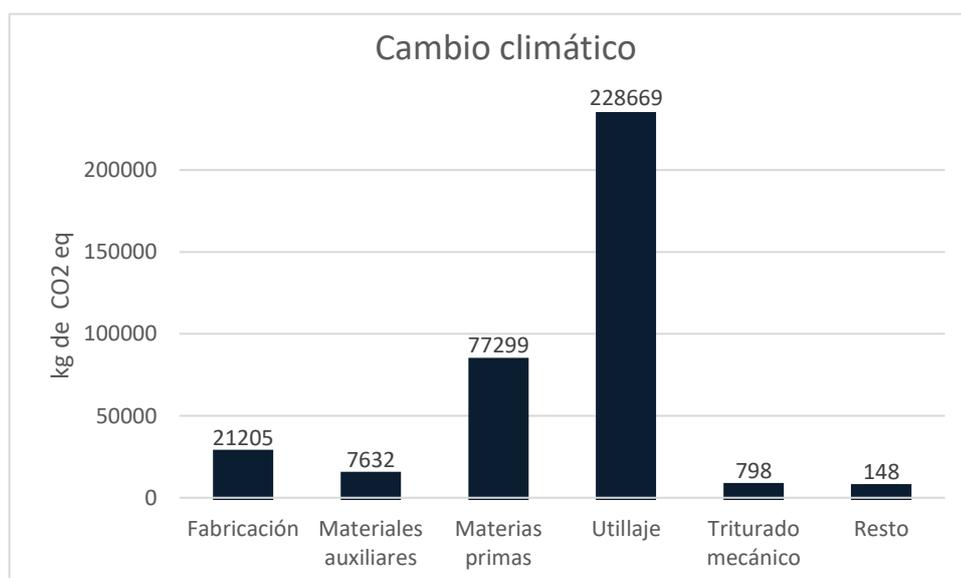


Figura 49: Impacto en el cambio climático

En el gráfico proporcionado por el software se puede observar que los procesos que más CO_2 emiten son los asociados a la extracción de materias primas y a la fabricación de los moldes utilizados en la producción de las palas de los aerogeneradores, seguidos del proceso de fabricación de las palas. Las grandes cantidades emitidas en estas etapas hacen plantearse la búsqueda de un segundo uso a estas palas de los aerogeneradores.

Es importante destacar que la categoría de impacto de cambio climático que incluye el carbono biogénico, tiene el mismo efecto ambiental, medido en kg de CO_2 equivalente, que la categoría que no lo considera. Esto significa que todo el impacto generado en el cambio climático se debe exclusivamente al CO_2 , y que los materiales y procesos utilizados no incluyen carbono proveniente de materiales biológicos.

Consumo de agua dulce

En segundo lugar, se evalúa el consumo de agua dulce a lo largo del ciclo de vida de las palas. Se elige evaluar esta categoría debido a la preocupación por la disminución del caudal de los ríos y del nivel freático.

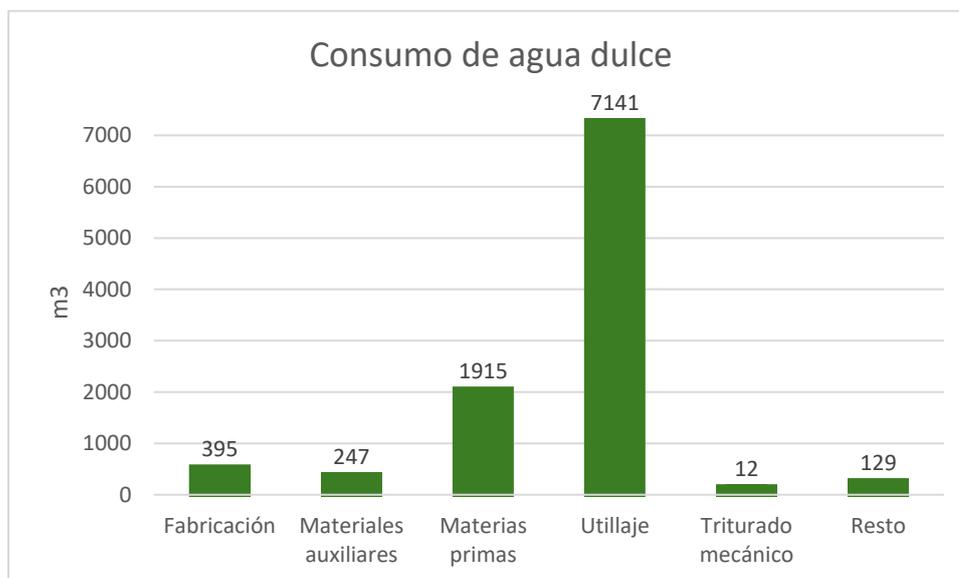


Figura 50: Consumo de agua dulce

En la Figura 50 se observa que las etapas críticas del ciclo de vida son la obtención de materiales para la fabricación de las palas y la producción de estas. La fabricación de moldes para palas, que consume una gran cantidad de agua, es compensada por su vida útil, permitiendo la producción de numerosas palas con el mismo molde. En cambio, los materiales auxiliares, que son de un solo uso y terminan en vertederos, representan una oportunidad de mejora mediante la adopción de prácticas que permitan reutilizar o reciclar estos materiales. Además, las materias primas utilizadas en el proceso han de

ser vírgenes por la pérdida de propiedades durante su reciclado, lo que hace que el consumo de agua en la fabricación de las fibras sea mayor que si las reciclásemos. A pesar de no poder usar las fibras recicladas para la fabricación de nuevas palas, se pueden utilizar en otros procesos de fabricación no estructurales, reduciendo el consumo de agua fresca de estos, mejorando la sostenibilidad y eficiencia desde otro foco.

Ecotoxicidad terrestre

Por otro lado, se analizan los resultados obtenidos en la categoría de ecotoxicidad terrestre. Esta categoría se elige para medir el impacto sobre el deterioro del suelo y el daño a los organismos terrestres. La unidad de medida de este impacto es en kilogramos equivalentes de 1,4-diclorobenceno, sustancia utilizada de referencia en este tipo de categorías debido a su alta toxicidad.

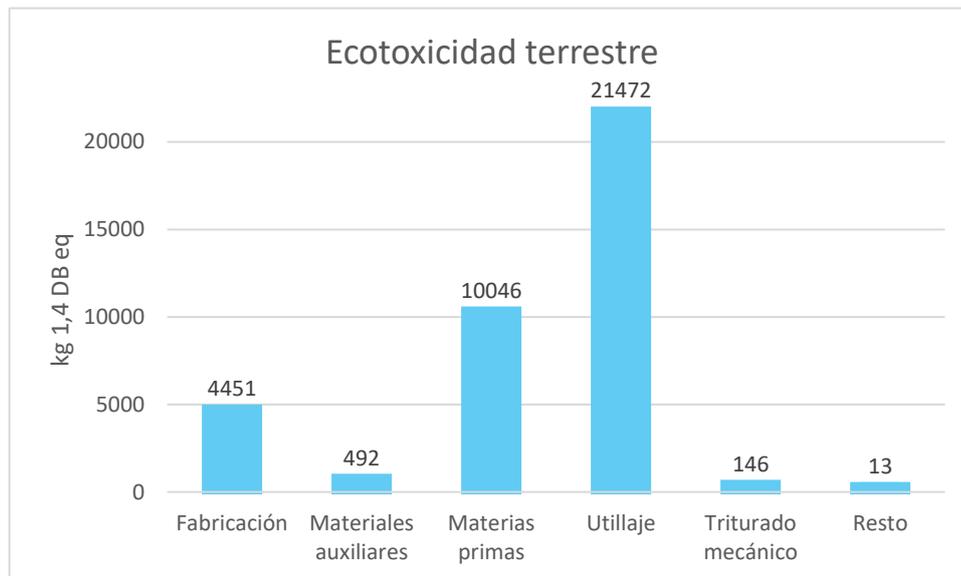


Figura 51: Ecotoxicidad terrestre

Toxicidad humana (No cancerígeno) y Toxicidad humana (cancerígeno)

Además, es interesante comentar que algunos procesos a lo largo del ciclo de vida de cualquier producto, y en particular en el de las palas de los aerogeneradores, generan impactos significativos en la salud humana. En las Figura 52 y Figura 53 se pueden observar las categorías de impacto “toxicidad humana, no cáncer” y “toxicidad humana, cáncer” donde se refleja el impacto que tienen estos procesos sobre la salud humana. Ambas categorías se miden en términos de kg de 1-4 diclorobenceno equivalente, que engloban la cantidad de sustancias tóxicas liberadas al medio ambiente que pueden afectar a la salud humana, ya sea por sustancias no cancerígenas o por sustancias cancerígenas.

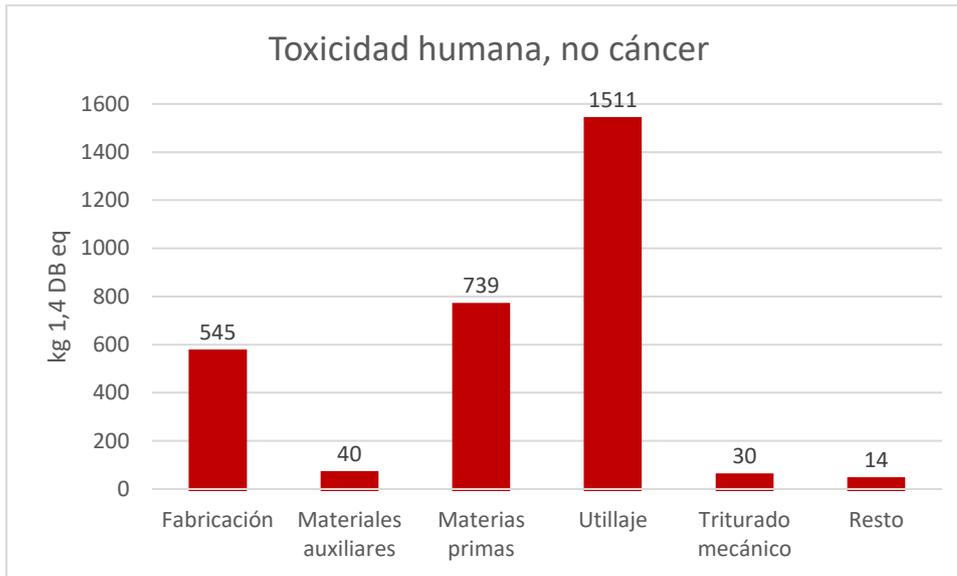


Figura 52: Toxicidad humana

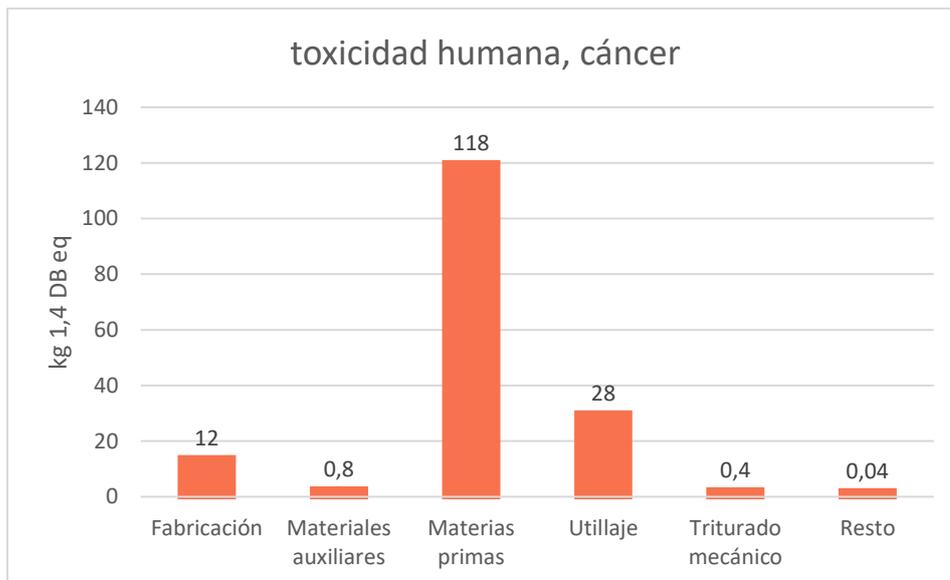


Figura 53: Toxicidad humana, cáncer

Independientemente del método de reciclaje utilizado para las palas, los valores correspondientes a las otras etapas del ciclo de vida permanecen constantes. Esto se debe a que los procesos de obtención de materiales y de fabricación de las palas no varían con el tipo de reciclaje. Por lo tanto, comparamos los diferentes métodos de reciclaje o de reutilización para poder observar los impactos específicos y determinar cuál es el que menos impacto genera.

La vida útil de las palas puede extenderse aproximadamente otros 10 años [4] Esto permite que las palas puedan utilizarse en otros aerogeneradores o en los mismos, aunque es probable que su rendimiento sea menor. Además, existe la

posibilidad de readaptarlas para darles una segunda vida útil como elementos de mobiliario urbano, como se describió en el apartado de metodología del capítulo 2.

Aunque la construcción de mobiliario urbano queda fuera del alcance del proyecto ya que habría que realizar la fabricación de estos, se ha incluido una etapa de reúso para las palas. Esta etapa simula que se prolonga su utilidad, y se asume que no se generan impactos significativos, ya que solo se realizan operaciones de mantenimiento e inspecciones y los impactos que pueden causar dichas operaciones son mínimos en comparación con los causados por las demás etapas.

Por otro lado, el triturado mecánico, la pirólisis y la solvólisis sí generan impactos ambientales significativos. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar detalladamente los impactos que genera cada uno de los reciclajes modelados:

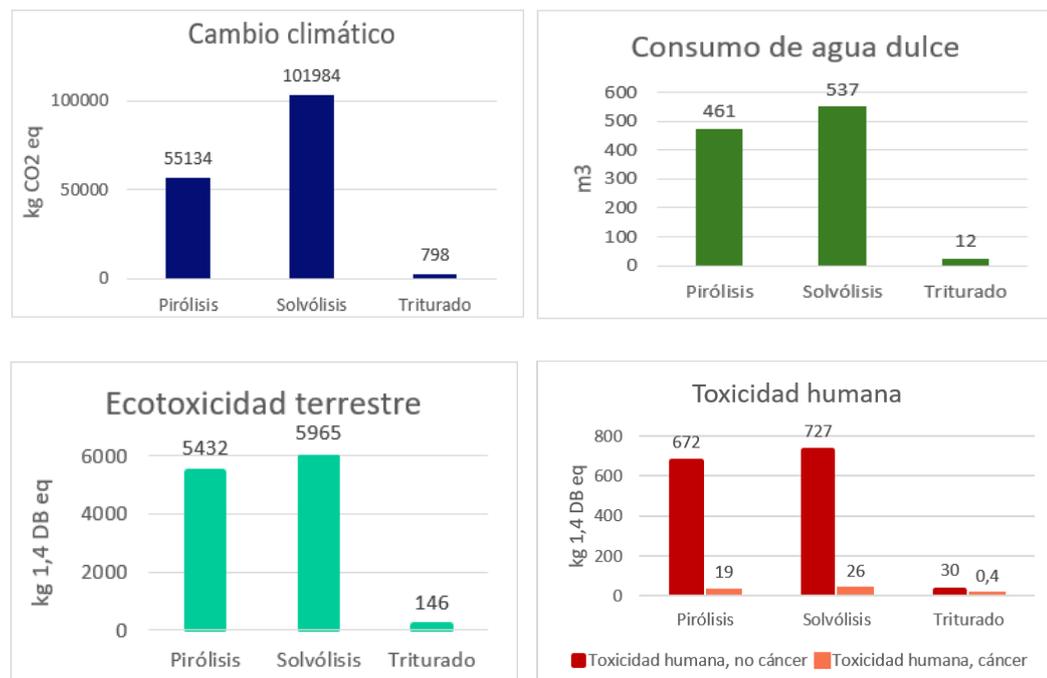


Figura 54: Comparación de alternativas de reciclaje

Gracias a este análisis, se puede observar que el proceso de reciclaje que más impacto genera en las cuatro categorías seleccionadas es la solvólisis. Esto se debe principalmente a la cantidad significativa de energía requerida para llevar a cabo el proceso. Al ser un proceso de descomposición química se necesita de grandes cantidades de energía térmica y eléctrica. Este alto consumo

energético aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero al agua, al aire e incluso al suelo.

Por otro lado, el triturado mecánico es el método con menor impacto ambiental. Este proceso implica simplemente la reducción del tamaño del material a través de fuerzas mecánicas, lo que requiere mucha menos energía. Además, este proceso no involucra el uso de solventes o catalizadores adicionales. Sin embargo, a pesar de ser la opción de reciclaje más sostenible, esta opción no separa las fibras de la resina, simplemente se reduce su tamaño para utilizarlo de relleno.

5.2.2. Análisis de impactos ambientales por endpoints

Una vez evaluadas las categorías de impacto intermedias, estas se agrupan en categorías finales o endpoints. En este caso, es el propio software el que realiza la normalización de los midpoints o categorías intermedias y los agrupa. Las categorías de impacto finales se presentan a continuación:

Salud humana

En el método ReCIPE, la categoría de impacto final de salud humana agrupa todas las categorías de impacto intermedias que afectan a la salud humana, como se puede ver en la Figura 25.

La categoría final de salud humana se mide utilizando una unidad llamada años ajustados por discapacidad (Disability-Adjusted Life Years, DALYs). Esta categoría combina los años vividos con la reducción de la esperanza de vida debido a enfermedades.

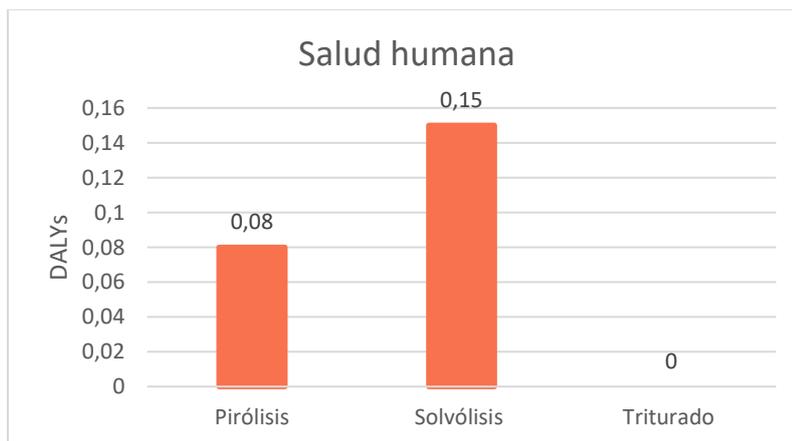


Figura 55: Categoría final de salud humana

Por lo tanto, la alternativa de reciclaje químico es la alternativa que más daño hace a la salud humana, causando 0,15 DALYs. Esto se debe al uso de productos químicos y al consumo de electricidad del proceso.

Recursos

Del mismo modo que para la categoría de salud humana, el método ReCIPe engloba todos los midpoints que provocan daños en la disponibilidad de los recursos. Esta categoría se mide en términos de costes adicionales de energía para obtener recursos minerales o fósiles debido a su agotamiento.



Figura 56: Categoría final de recursos

Se puede observar que la alternativa que más daño causa a la disponibilidad de los recursos es la solvólisis. Esto se debe a las grandes cantidades de energía y agua utilizadas en el proceso. Por otro lado, la alternativa que menos agotamiento de recursos supone es el reciclado mecánico, ya que esta requiere de menor energía y no utiliza ningún recurso adicional.

Ecosistema

La categoría final de ecosistema se mide en número de especies afectadas por año debido a actividades humanas. Cabe destacar que esta categoría muestra valores muy pequeños para el proceso de reciclaje de una única pala pero a lo largo de los años y debido al número de palas recicladas al año puede suponer una pérdida significativa de la biodiversidad.



Figura 57: Categoría final de ecosistemas

5.1. Análisis conjunto de impactos ambientales y económicos

Una vez evaluados los impactos ambientales y económicos por separado, se realiza un análisis de manera conjunta. Esto nos va a permitir determinar que alternativa de reciclaje es mejor en ambos aspectos.

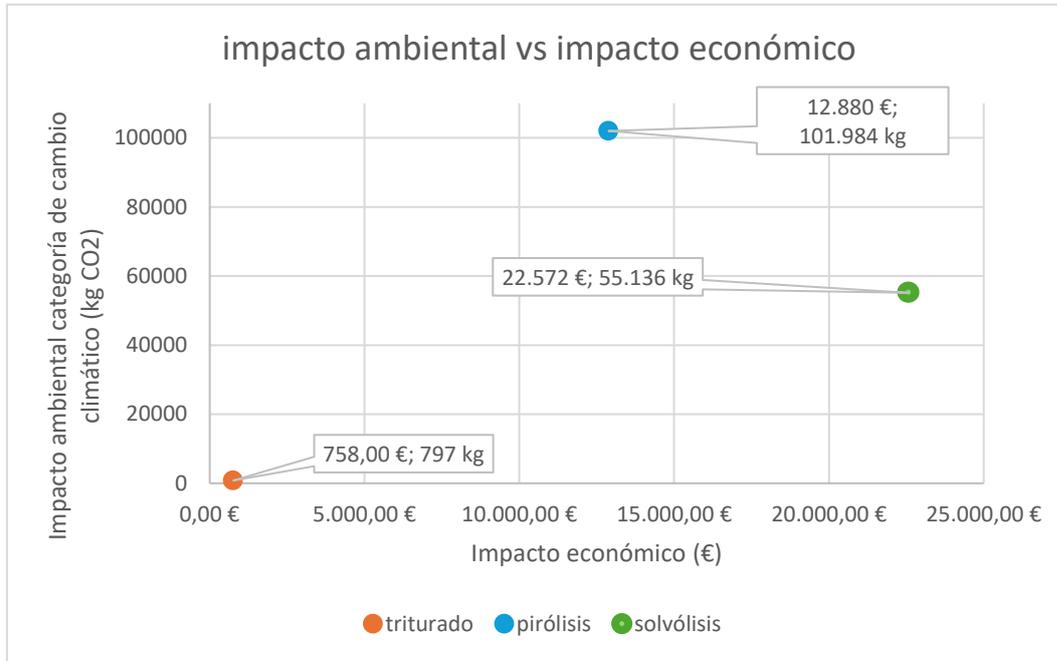


Figura 58: Gráfica impacto ambiental-impacto económico

En la Figura 58 se presenta la gráfica del impacto ambiental frente al impacto económico, proporcionando una visualización clara de las comparaciones entre las opciones de reciclaje. Al relacionar las tres opciones de reciclaje en función de estos dos criterios, podemos observar que el reciclaje mecánico es la alternativa más viable, no tan solo por su menor impacto ambiental si no también por su menor impacto económico. Por otro lado, el reciclaje térmico y químico debido al elevado de uso de energía suponen un gran impacto ambiental y económico.

Sin embargo, es importante considerar que el reciclaje mecánico presenta ciertas limitaciones, como la dificultad para separar materiales de manera efectiva y la degradación del material al ser triturado.

6. CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones generales

En términos generales, el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) y el Análisis de Costes de Ciclo de Vida (LCC) son metodologías que abren líneas de investigaciones futura en términos de economía circular. Para la aplicación de estas metodologías se han desarrollado programas que nos permiten calcular el impacto en términos de toxicidad humana, consumo de agua o cambio climático entre otros. Uno de estos programas es GaBi, ampliamente utilizado para realizar LCA. Sin embargo, aún no está desarrollado para llevar a cabo el LCC por la escasez de información. Esta limitación hace necesaria la utilización de la herramienta Excel para la realización del análisis.

En el contexto de la versión educativa del software GaBi, la base de datos disponible es insuficiente para realizar un análisis completo del ciclo de vida de un producto. Esto se debe a la limitada cantidad de datos específicos incluidos en la versión educativa. Para suplir dicha carencia, es necesario recurrir a la versión profesional, que ofrece una base de datos más extensa, así como a datos obtenidos de artículos científicos u otros estudios realizados.

Para estudiar de manera detallada el ciclo de vida del producto es necesario tener un conocimiento extenso de los procesos de fabricación y reciclado. Esto se debe a que cada etapa incluye una serie de procesos que deben ser considerados para obtener una visión completa del impacto y los costes asociados al producto. Si bien puede ser sencillo identificar las materias primas utilizadas, las etapas de producción y de reciclaje, generalmente integran múltiples pasos, cada uno con sus propias características y requisitos que no deben pasarse por alto. Por ello, resultará más fácil si la empresa que realiza el análisis tiene acceso rápido a la información de los procesos utilizados.

En resumen, aunque existen limitaciones actuales en el uso del software GaBi para el LCC, la combinación de Excel y fuentes de datos complementarias permite realizar un análisis exhaustivo que refleja los impactos económicos del producto a lo largo de su ciclo de vida.

6.2. Conclusiones específicas

El análisis de ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores ha permitido identificar los puntos críticos, tanto desde una perspectiva ambiental como económica. Este estudio nos ha relevado las etapas y procesos que generan

los mayores impactos y costos, proporcionando información suficiente para la toma de decisiones.

En términos de impacto ambiental, la extracción de materias primas y la fabricación de moldes, junto con la producción de las palas, son los principales contribuyentes a las emisiones de CO_2 . Además, son las etapas que mayor consumo de agua dulce suponen, lo que subraya la importancia de reducir los impactos en estas fases.

En el caso de la toxicidad humana, se revela que a lo largo del ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores se emiten sustancias tóxicas que pueden resultar perjudiciales para la salud humana. Si es cierto que los valores de estas categorías de impacto son mucho menores que los de otras.

En cuanto a las alternativas de reciclaje estudiadas; la solvólisis permite la recuperación de parte de las fibras, pero es la alternativa que mayor impacto genera debido a su alto consumo de energía. En el caso del reciclaje mecánico, aunque presenta el menor impacto ambiental, tiene muchas limitaciones de uso de los materiales triturados obtenidos. En cambio, la pirólisis ofrece un balance intermedio, proporcionando fibras recicladas con un impacto menor que el reciclaje por solvólisis.

En el caso de los impactos económicos, las etapas que mayores costes generan son la extracción de materias primas y de materias auxiliares. En cuanto al reciclaje de las palas, la alternativa que más impacto económico supone es la solvólisis debido al gran consumo energético y al uso de disolventes para conseguir la separación de los materiales.

Finalmente, integrando ambos análisis y a pesar de las limitaciones en la separación de materiales, la opción más viable en términos de impactos ambientales y económicos es el triturado mecánico. A pesar de esto, esta no es la única alternativa utilizada para reciclar las palas.

En resumen, este estudio destaca la necesidad urgente de soluciones de reciclaje innovadoras que minimicen los impactos ambientales y optimicen los recursos. La adopción de nuevas alternativas es esencial para mejorar la sostenibilidad del ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores.

6.3. Líneas de mejora

Para reducir los impactos en la extracción de materias primas, se podrían sustituir parcialmente las fibras de vidrio por fibras naturales, como se puede observar en otros estudios. [45] La obtención de estas fibras es más sencilla y

genera menos impactos ambientales en comparación con la fibra de vidrio. Esto se debe a que el cultivo y procesamiento del cáñamo requiere de menos energía y recursos químicos, además de ser un material renovable.

Además, hasta la fecha no se ha encontrado una opción de reciclaje que permita conservar las propiedades de las fibras. Sin embargo, si se lograra mantener estas propiedades durante el reciclaje, las fibras podrían reincorporarse al proceso de producción, dándoles un segundo uso y reduciendo así la necesidad de obtener nuevas fibras.

Por otro lado, el consumo de energía a lo largo del ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores es elevado. Por ello, podría ser beneficioso mejorar los equipos de producción y optimizar el tiempo de operación, reduciendo así el consumo de energía.

A pesar de los impactos ambientales y económicos generados durante el ciclo de vida de las palas de aerogenerador y la necesidad evidente de encontrar soluciones de reciclaje, estas palas siguen siendo fundamentales para la generación de la energía que abastece a los hogares en la actualidad.

Bibliografía

En este capítulo se muestran las referencias bibliográficas utilizadas, organizadas por orden de aparición en el texto:

- [1] Asociación Española de Normalización, *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. UNE-EN ISO 14040:2006*, AENOR, 2006.
- [2] A. C. Solé, *Aerogeneradores*, Cano Pina S.L, 2008.
- [3] K. Branner y F. Mølholt Jensen, «Introduction to wind turbine blade design,» de *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials, 2nd ed.* , Woodhead Publishing, 2023, pp. 3-53.
- [4] Asociación Empresarial Eólica, «Economía circular en el sector eólico. Palas de aerogeneradores,» Asociación Empresarial Eólica, 2022.
- [5] W. D. Callister, *Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Reverté, 2016.
- [6] Asociación Empresarial Eólica, «La eólica en España,» 15 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/>. [Último acceso: 16 Abril 2024].
- [7] Red Eléctrica, «Informe de energías renovables,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-de-energias-renovables/viento/generacion-viento>. [Último acceso: 16 Abril 2024].
- [8] ASEPA, Repsol, Catedra de transición energética, Asociación Española de Carreteras, «Análisis de Ciclo de Vida: Herramienta para la movilidad sostenible,» 2024.
- [9] E. H. Leiva, *Análisis de Ciclo de Vida*, Fundación EOI Escuela de Organización Industrial, 2016.
- [10] C. Alejandrino, I. T. Mercante y M. D. Bovea, «Combining O-LCA and O-LCC to support circular economy strategies in organizations: Methodology and case study,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 336, nº 130365, 2022.
- [11] Autor desconocido, *Capítulo 3: Metodología del análisis del ciclo de vida*, 2004.

- [12] R. Carnerero, *Análisis de ciclo de vida. Cuantificación de los impactos ambientales*, DEGREN, design & green engineering, 2019.
- [13] M. Palacios Osácar y J. del Carmen Elcuaz, *Planta móvil de fabricación de palas de aerogenerador. Trabajo de Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación*, Pamplona, 2012.
- [14] Deloitte, *Análisis de Ciclo de Vida (ACV)*, 2012.
- [15] T. Strauss, «Blade Made Playgrounds,» Superuse Studios, 18 Diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.superusestudios.com/projectplus/blade-made/>. [Último acceso: 6 Mayo 2024].
- [16] S. Rotterdam , «Blade-Made Willemsplein LGBTQI+,» Superuse Studios, 10 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://projects.superusestudios.com/projects/rewind-willemsplein-lgbtqi/>. [Último acceso: 6 Mayo 2024].
- [17] D. Jiménez, K. Valdes, R. González y P. Montero-Prado, «Planificación para la reutilización y reciclaje de las palas de aerogeneradores de fibra de vidrio y de carbono,» *Revista I+D tecnológico* , p. 15, 4 Noviembre 2022.
- [18] S. P. d. G. A. Ihobe, *Guía para aplicación conjunta de los Análisis de Ciclo de Vida Ambiental (LCA) y de Costes (LCC)*, Bilbao: Ihobe, 2017.
- [19] Asociación Empresarial Eólica, *La fabricación de las palas de los aerogeneradores y el uso de madera de balsa en su fabricación*, Asociación Empresarial Eólica, 2021.
- [20] Diab, «Diab's Divinycell H,» [En línea]. Available: <https://www.diabgroup.com/products-services/divinycell-pvc/divinycell-h/>. [Último acceso: 8 junio 2024].
- [21] Resoltech, *Ficha técnica RESOLTECH 3350 XT*, 2014.
- [22] PSR pararrayos, *Ficha técnica Pararrayos PDC "S"*.
- [23] Gerber Technology, [En línea]. Available: <https://www.aeroexpo.online/es/prod/gerber-technology/product-171707-61909.html>. [Último acceso: 20 Junio 2024].

- [24] R. Balart Gimeno, D. Lascano Aimacaña, D. García García, S. Rojas Lema, L. Quiles Carrillo, S. Torres Giner, J. Ivorra Martínez y N. Montañes Muñoz, «Fabricación de laminados de material compuesto mediante infusión de resina asistida por vacío (VARIM),» Universidad Politécnica de Valencia, 2020. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10251/139497>.
- [25] 3B Fibreglass, «Contacts | 3B Fibreglass,» [En línea]. Available: <https://www.3b-fibreglass.com/contacts>. [Último acceso: 8 junio 2024].
- [26] Sicomin, «Contact - Sicomin,» 6 marzo 2024. [En línea]. Available: <https://sicomin.com/en/contact/>. [Último acceso: 8 Junio 2024].
- [27] Diab, «Contact us - Diab,» [En línea]. Available: <https://www.diabgroup.com/contact>. [Último acceso: 8 Junio 2024].
- [28] Airtech Europe SARL, «Contact us | Airtech Europe,» [En línea]. Available: <https://www.airtech.lu/es/contact-us>. [Último acceso: 8 Junio 2024].
- [29] Gurit, «Sites locations - Gurit,» 29 marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.gurit.com/sites-locations/>. [Último acceso: 8 junio 2024].
- [30] Asociación Empresarial Eólica, «Mapa de parques eólicos - Asociación Empresarial Eólica,» 7 Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://aeolica.org/sobre-la-eolica/mapa-de-parques-eolicos/castilla-leon>. [Último acceso: 8 junio 2024].
- [31] Husqvarna, «Husqvarna Construction,» [En línea]. Available: <https://www.husqvarnaconstruction.com/es/cortadoras/k770/>. [Último acceso: 20 junio 2024].
- [32] S. Utekar, S. V K, N. More y A. Rao, «Comprehensive study of recycling of thermosetting polymer composites –Driving force, challenges and methods,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 207, n° 108596, 2021.
- [33] G. Moiceanu, G. Paraschiv, G. Voicu, M. Dinca, M. C. Olivia Negoita y P. Tudor, «Energy Consumption at Size Reduction of Lignocellulose Biomass for Bioenergy,» *Sustainability*, vol. 11(9), n° 2477, 2019.
- [34] K. Kooduvalli, J. Unser, S. Ozcan y U. K. Vaidya, «Embodied Energy in Pyrolysis and Solvolysis Approaches to Recycling for Carbon Fiber-Epoxy Reinforced Composite Waste Streams,» *Recycling*, vol. 7(1), n° 6, 2022.

- [35] M. Wu, J. Sadhukhan, . R. Murphy, U. Bharadwaj y X. Cui , «A novel life cycle assessment and life cycle costing framework for carbon fibre-reinforced composite materials in the aviation industry,» *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, vol. 28, nº 5, pp. 566-589, 2023.
- [36] Mel Composites, «Resina Epoxy laminación en húmedo SR8500 + SD8705 - Mel Composites,» 29 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://tienda.melcomposites.es/product/resina-epoxy-laminacion-en-humedo-sr8500-sd8605/>. [Último acceso: 24 junio 2024].
- [37] Castro Composites, «Resinas y fibras de refuerzo,» [En línea]. Available: <https://www.castrocompositesshop.com/es/>. [Último acceso: 24 Junio 2024].
- [38] Airtech International, Inc., «Airtech Intl. Store,» [En línea]. Available: <https://estore.airtechintl.com/>.
- [39] Grupo PYMA, «Tienda de pinturas, decoración y bricolaje,» [En línea]. Available: <https://www.pyma.com/>.
- [40] PSR pararrayos, «Sistemas de protección interior y exterior contra rayos.Tarifa.,» 2015.
- [41] ChemAnalyst, «Global Chemical and Petrochemicals, Specialty Chemicals, Elastomer and Rubber, Fertilizer and Feedstock - Latest Chemical Prices, News and Market Analysis,» [En línea]. Available: <https://www.chemanalyst.com/>.
- [42] LM Wind Power, «Sustainability report 2022,» 2023.
- [43] Comercial Reguladora, «TUR 3 - Comercializadora regulada,» [En línea]. Available: https://www.comercializadoraregulada.es/regulada/gas/tur_3. [Último acceso: 20 Junio 2024].
- [44] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Acuerdos de París,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/elmentos-acuerdo-paris.html>. [Último acceso: 24 Junio 2024].

- [45] G. Cicala, G. Cristaldi, G. Recca, G. Ziegmann, A. El-Sabbagh y M. Dickert, «Properties and performances of variuos hybrid glass/natural fibre composites for curved pipes,» *Materials & Design* , vol. 30 (7), pp. 2538-2542, 2009.

Anexos

Anexo I: Simulación de los componentes en GaBi

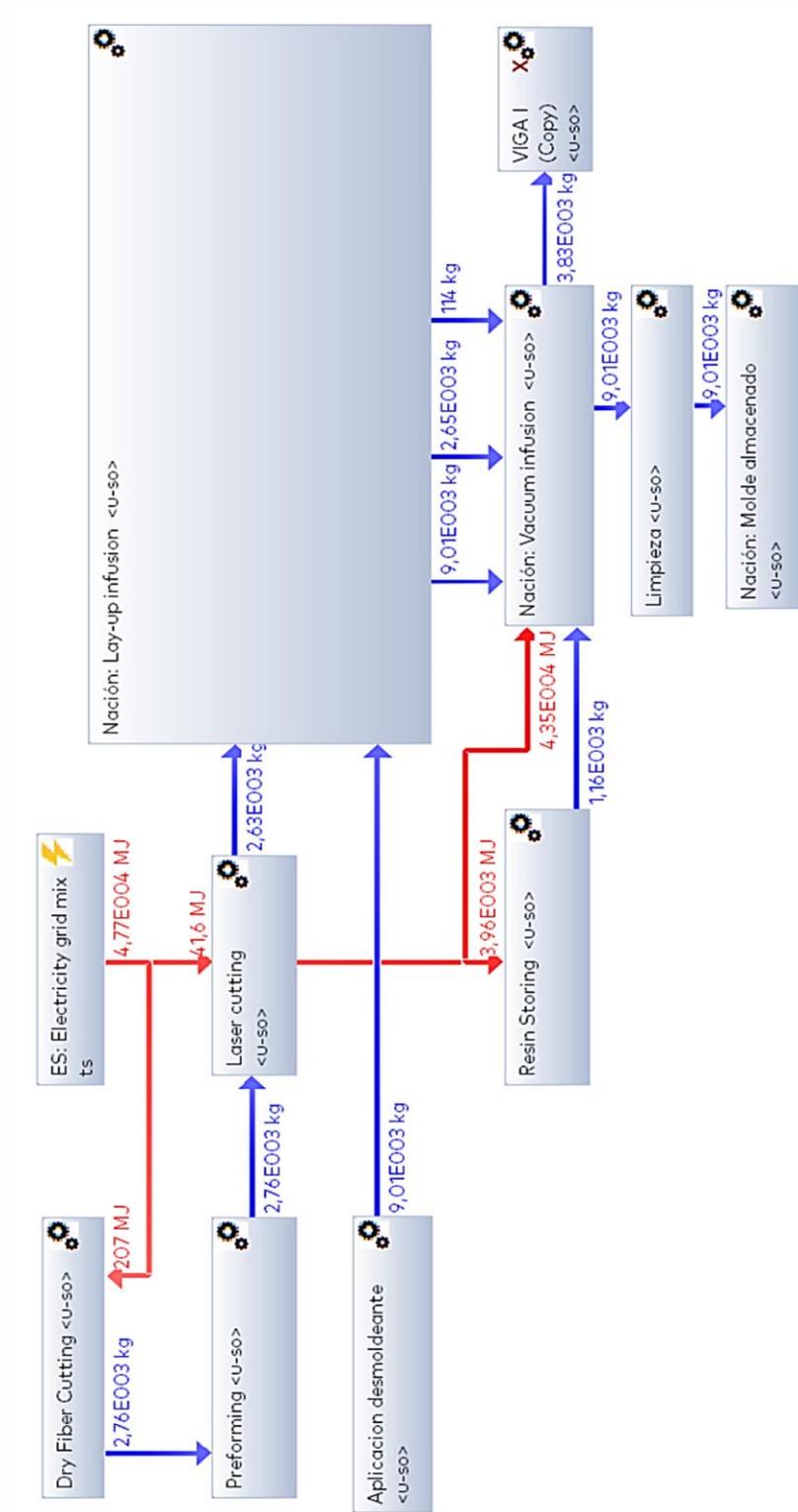


Figura 59: Esquema de fabricación de la Viga I en GaBi

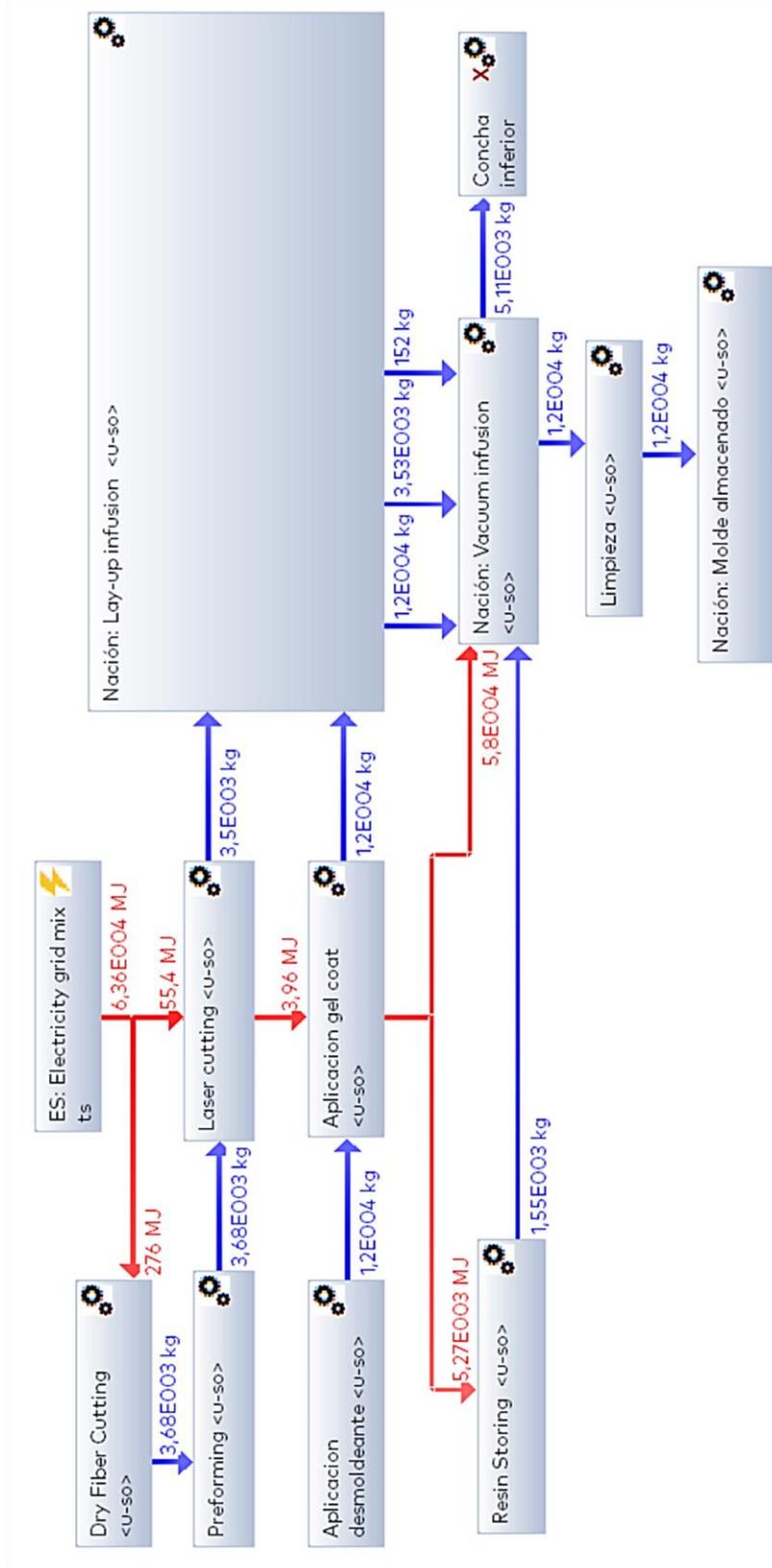


Figura 61: Esquema de fabricación de la Carcasa Inferior

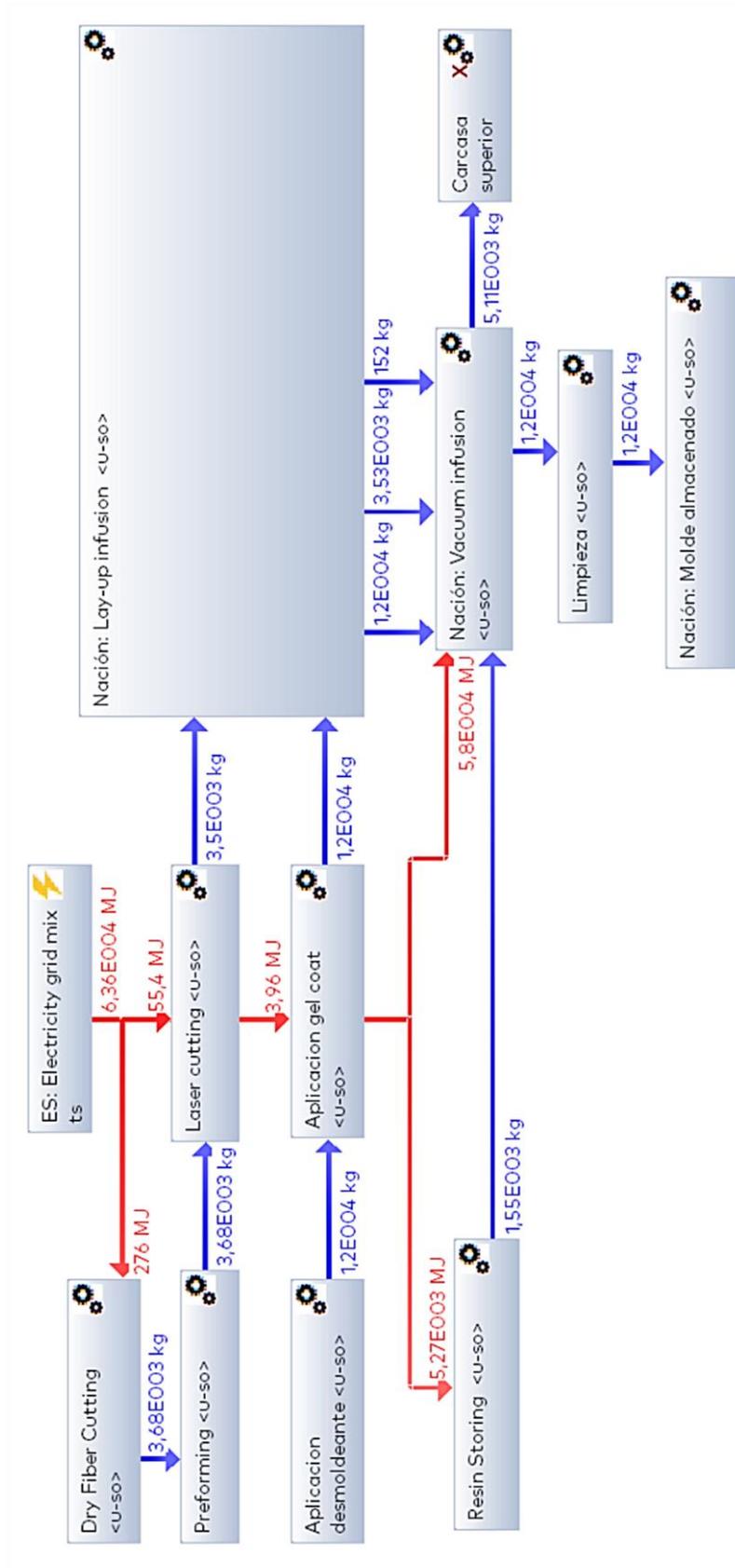


Figura 62: Esquema de fabricación de la carcasa superior

Anexo II: Simulación del ciclo de vida en GaBi

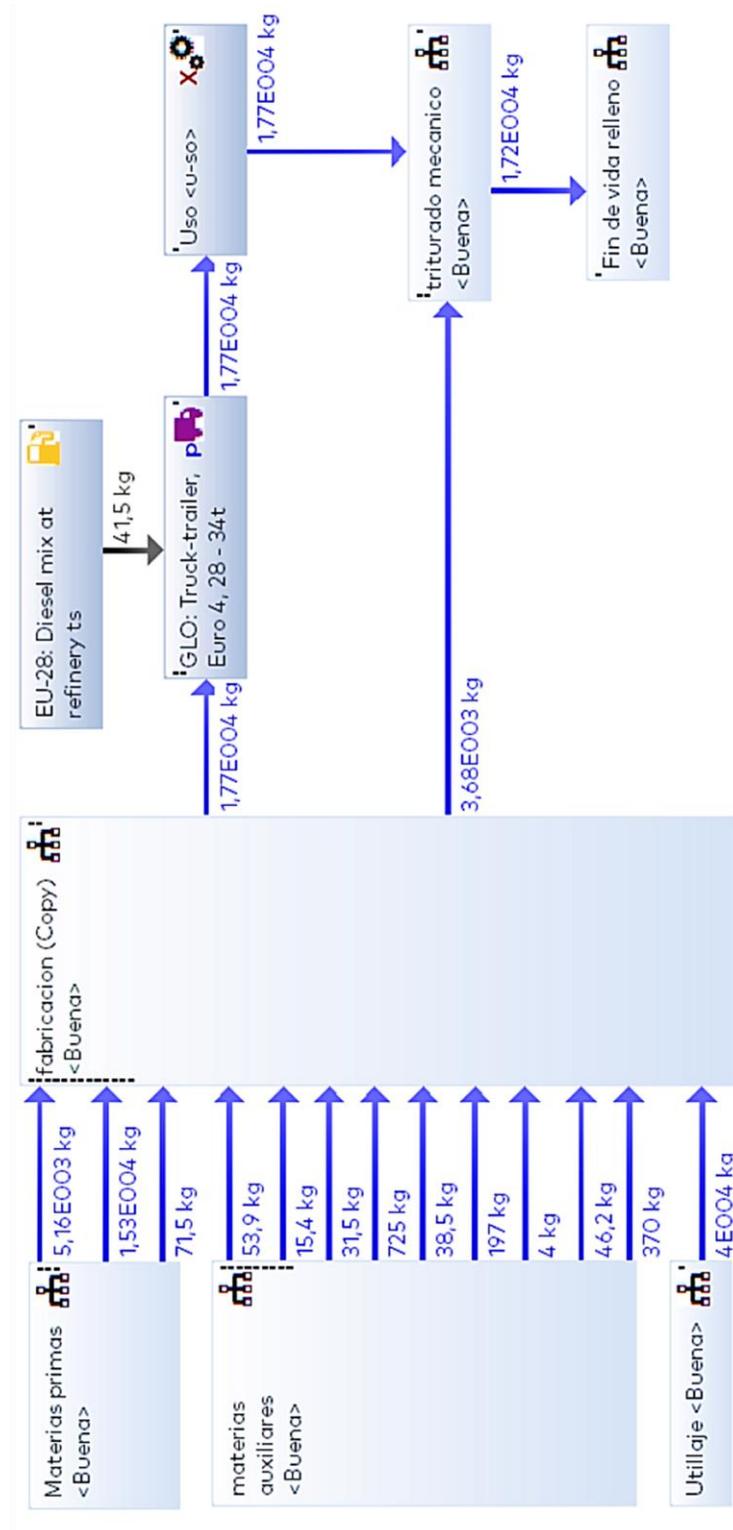


Figura 63: Plano final por reciclado mecánico

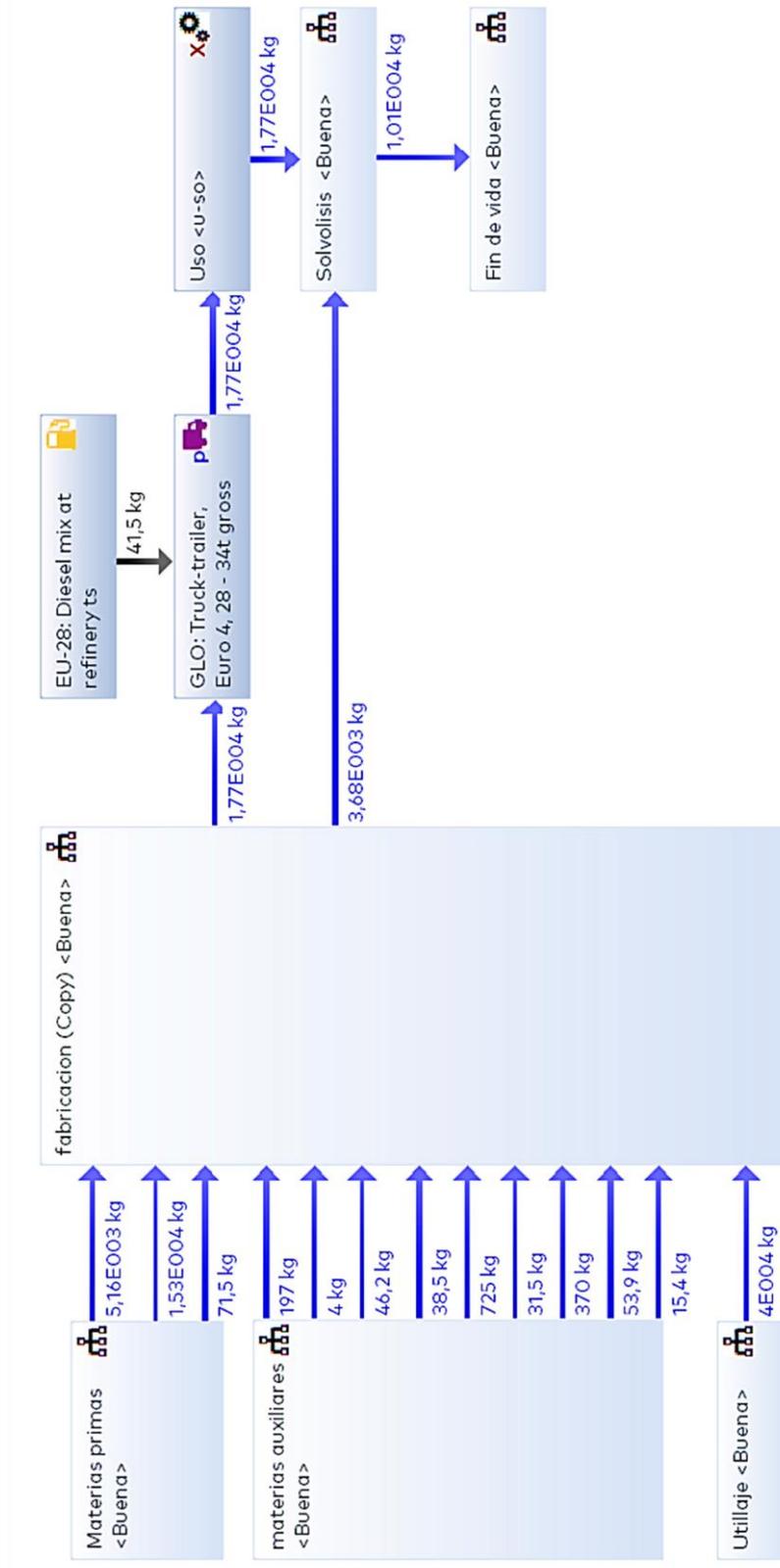


Figura 64: Esquema final por reciclado químico en GaBi

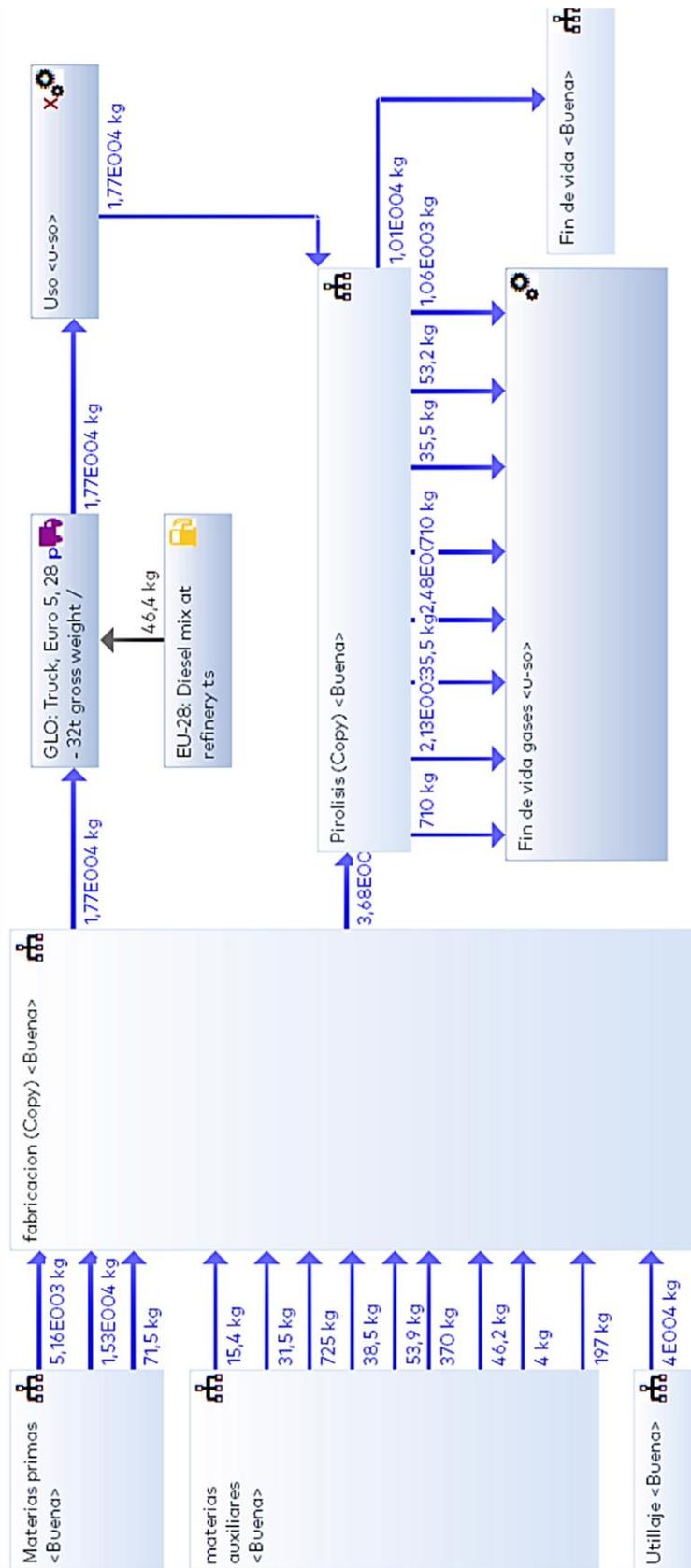


Figura 65: Esquema final por reciclado térmico en GaBi

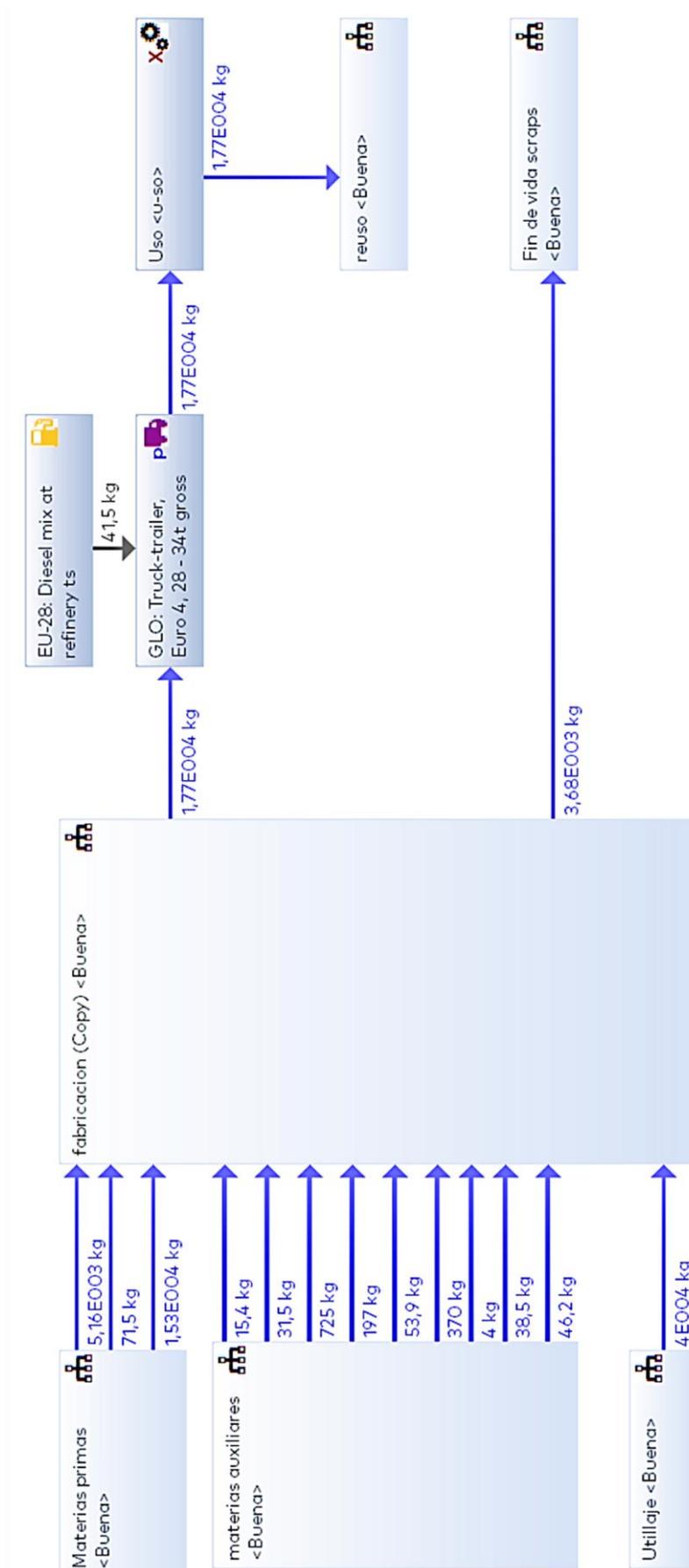


Figura 66: Esquema final por reúso en GaBi