

# Lightweight materials development for automotive engineering use. Manufacture and End of Life optimization through Life Cycle Assessment.

Hugo Afonso González<sup>1</sup>, Julen Ibarretxe, Esther Acha<sup>2</sup>, Udane Olaziregi<sup>3</sup>, Aritz Esnaola<sup>3</sup>, Adriana Serras, Maider Iturrondobeitia.

1 - Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea. 2 - Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente. Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU). 3 - Universidad de Mondragón Mondragón Unibertsitatea.

## Abstract

With fuel economy and lightweight design becoming ever more significant due to the current materials, resources and environmental crisis, the manufacture of polymer composites for automotive industry use has experienced a steady growth in the last years and is expected to keep growing in the coming years. This means that there is a vast range of different polymer composites available in the market, with their unique properties, manufacturing processes and materials imbedded in them, each with their own set of impacts on the environment throughout their whole life cycle. The end-of-life treatment of a composite determines a substantial fraction of its footprint on the planet, and advanced treatments, namely pyrolysis can be used to obtain high value added compounds such as hydrogen and other light fuels. This study aims to address and quantify the impacts associated with the manufacturing and end of life treatments of an experimental glass fibre mat reinforced thermoplastic composite and compare them with the impacts caused by materials currently used in the automotive industry. Life Cycle assessment methodology will be used to compare the environmental impacts of this new material with traditional glass fibre composites, natural fibre reinforced composites and other materials with similar mechanical properties.

### OPEN ACCESS

**Published:** 31/07/2023

**Accepted:** 10/06/2023

**Submitted:** 22/05/2023

**DOI:** 10.23967/r.matcomp.2024.01.01

#### Keywords:

Análisis de ciclo de vida  
termoplásticos reforzados  
Industria automotiva  
sostenibilidad  
pirólisis

## 1. Introducción

Para hacer frente al reto de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en automoción, existen diferentes rutas o combinaciones de estas que pueden ser tomadas. La mejora de la eficiencia de los motores de combustión, el uso de vehículos eléctricos o de combustibles alternativos como el etanol o el hidrógeno son necesarias para alcanzar los objetivos de la Unión Europea. Existen otras medidas a implementar, como la conducción ecológica, la servitización del transporte privado o la reducción del peso de los vehículos. Esta última medida es también conocida como diseño lightweight.

El diseño lightweight es uno de los factores clave para alcanzar un medio de transporte más sostenible, reduciendo el uso de energía y materias primas durante la manufactura de las partes de un vehículo. Con el uso de materiales con un mayor rendimiento relativo a sus propiedades físicas, que han sido diseñados específicamente para el propósito que cumplirán las piezas que conformarán, se obtendrá una mejora general en su eficiencia

energética, material, ambiental y económica. [1]

Estudios anteriores han demostrado que una reducción del 10% del peso del cuerpo del vehículo (excluyendo el peso del motor) se traduce en una reducción de hasta el 5.6% de su consumo de combustible. Cabe destacar que, a pesar de la notable reducción de emisiones asociadas a un menor consumo de combustible, estos materiales ligeros y complejos son también más complejos de reciclar y pueden requerir más energía para su procesado y manufactura. Esto implica que para poder asegurar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de un vehículo lightweight, su ciclo de vida completo debe ser sometido a un Análisis de Ciclo de Vida. [2]

El desarrollo de materiales compuestos juega un papel importante en el diseño lightweight donde resaltan los composites de matriz polimérica, seguidos por los metálicos y los cerámicos. Estos materiales cuentan con propiedades deseables para la industria automotiva, tales como una alta resistencia específica, baja conductividad térmica y alta resistencia a la corrosión, además de ofrecer flexibilidad a la hora de diseñar. Más del 65% de las piezas de automoción fabricadas con composites poliméricos son usadas para piezas exteriores e interiores, pero pueden ser diseñadas para uso estructural y en la transmisión. [3]

La pieza experimental sobre la que gira este estudio se trata de un composite de matriz de poliamida (PA6) y fibra de vidrio (GF) conformada a través de moldeo de compresión en forja GMT. Los principales métodos de manufactura de los composites de composición similar disponibles en el mercado son el moldeo por transferencia de resina (RTM), el moldeo por compresión y el moldeo por inyección.

Cuando hablamos de moldeo por compresión, por lo general las fibras son preimpregnadas en la matriz polimérica, obteniendo planchas rectangulares de este material compuesto, que luego serán recalentadas y forjadas en una prensa para obtener la forma deseada. Este tipo de procesos permite trabajar a temperaturas relativamente bajas, obteniendo piezas de alto rendimiento con un menor consumo energético, a expensa de un tiempo de ciclo algo mayor en comparación a la inyección o al RTM. [4]

El uso de plásticos para estos composites implica la problemática añadida

de la gestión de los residuos asociados y a la polución de microplásticos, sumándose a la ingente cantidad de estos residuos generada anualmente. El uso de polímeros biobasados y biodegradables podría ser la solución para reducir los impactos asociados al uso de estos composites de matriz polimérica, pero por el momento el ecodiseño para conseguir una buena longevidad, reparabilidad y reciclabilidad de estas piezas es la única solución económicamente viable a nivel industrial. [5]

Los posibles fines de vida de los plásticos usados en estos composites una vez sean considerados como residuos son la deposición en vertederos, la valorización energética por combustión y el reciclado.

El reciclado térmico de composites reforzados con GF emplea altas temperaturas para separar las fibras de la matriz polimérica tratando de deteriorar las propiedades de las fibras lo mínimo posible. Adicionalmente, estos procesos dan lugar a productos de valor añadido generados por la descomposición de la matriz, que pueden ser procesados como nuevos combustibles o para la fabricación de nuevos composites. La degradación de la fibra por este tratamiento implica una bajada de rendimiento de sus propiedades mecánicas comparadas con fibras vírgenes, pero pueden ser usadas en porcentajes de hasta el 20% en nuevas piezas sin causar una pérdida demasiado significativa. [6]

## 2. Metodología

### Objetivo y alcance

El objetivo de estudio de este análisis es el seguimiento del ciclo de vida del composite experimental de poliamida y fibra de vidrio diseñado para uso en automoción durante su manufactura y sus posibles escenarios de fin de vida, con el objetivo primario de reducir los impactos ocasionados durante estas etapas.

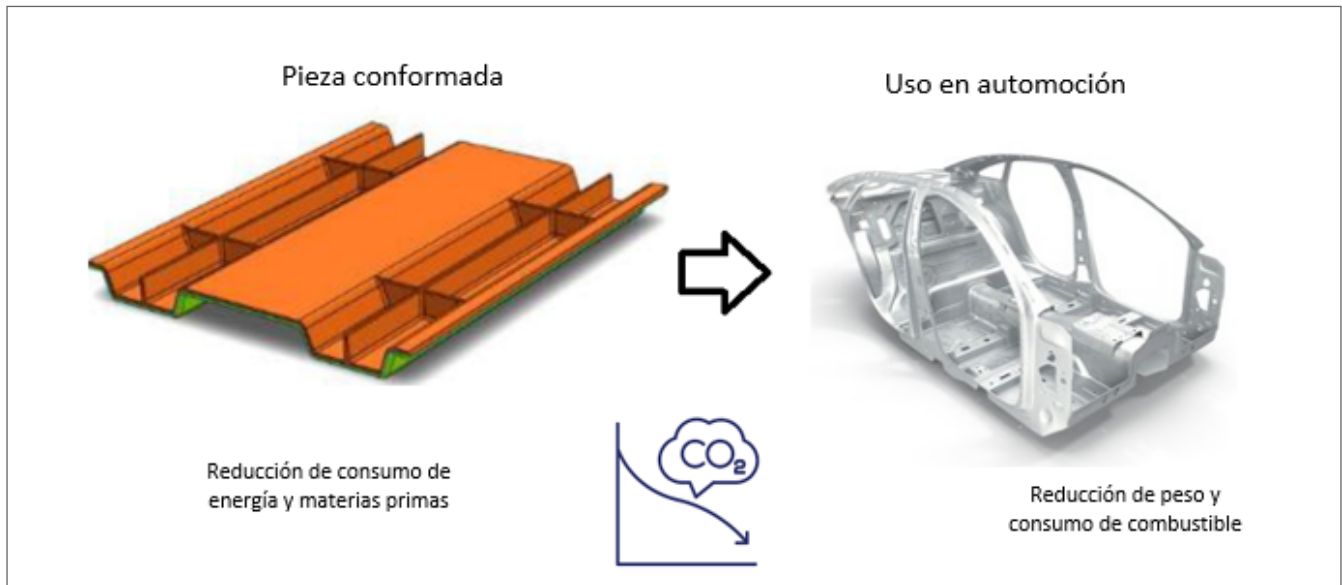


Figura 1. Representación del posible uso de este material para sustituir determinadas piezas actualmente fabricadas en aluminio, consiguiendo no solo mejor eficiencia de combustible, si no una reducción en costes de procesado y extracción de materiales.

Con este objetivo en mente, se han analizado por separado dos casos, trabajando como unidad funcional una pieza conformada de 1080 gramos de peso base, sobre el que se han estimado unas reducciones de peso del 15-30% y unas medidas de 300x28x4mm:

- 1) La manufactura de tres piezas de composite, reforzadas en sus zonas más frágiles con un inserto de fibra de vidrio y poliamida impreso en 3D, con una, tres y 5 capas, permitiendo una reducción de peso y de tiempos de procesado. (1r, 3r, 5r)
- 2) Dos posibles fines de vida para estas piezas, comparando el vertedero con un proceso de pirólisis de alto rendimiento, recuperando productos de valor añadido.

Inserto3D	Flujo	Entradas	Salidas	Cantidad	Uds	Proveedor
1r	Nylon 6	X	X	6.68	g	Market for Nylon 6
	Fibra de vidrio	X		1.80	g	Market for Glass Fibre
	Energía	X		0.099	kWh	
					8.48	g

	Inserto 1r					Electricity, medium voltage
3r	Nylon 6	X	X	3.39	g	Market for Nylon 6
	Fibra de vidrio	X		3.16	g	
	Energía	X		0.185	kWh	Market for Glass Fibre
	Inserto 3r			6.55	g	Market for Electricity, medium voltage
5r	Nylon 6	X	X	1.71	g	Market for Nylon 6
	Fibra de vidrio	X		2.84	g	
	Energía	X		0.243	kWh	Market for Glass Fibre
	Inserto 5r			4.55	g	Market for Electricity, medium voltage
Precaalentado	Flujo	Entradas	Salidas	Cantidad	Uds	Proveedor
1r	Nylon 6, glass-filled	X	X	1080.0	g	Market for Nylon 6, glass-filled
	Energía	X		1.000	kWh	
	GMT 200°C			1080.0	g	Market for Electricity, medium voltage
3r	Nylon 6, glass-filled	X	X	918.0	g	Market for Nylon 6, glass-filled
	Energía	X		0.800	kWh	
	GMT 200°C			918.0	g	Market for Electricity, medium voltage

5r	Nylon 6, glass-filled	x x	x	756.0 0.600 756.0	g kWh g	Market for Nylon 6, glass-filled  Market for Electricity, medium voltage
GMT	Flujo	Entradas	Salidas	Cantidad	Uds	Proveedor
1r	Inserto 1r  Preimpr egnado 200°C  Energía  Pieza GMT	x x x	x	8.48 1080 1.25 1088.48	g g kWh g	Inserto 3D  Precalentado  Market for Electricity, medium voltage
3r	Inserto 3r  Preimpr egnado 200°C  Energía  Pieza GMT	x x x	x	6.55 918.0 1.25 924.55	g g kWh g	Inserto 3D  Precalentado  Market for Electricity, medium voltage
5r	Inserto 5r  Preimpr egnado 200°C  Energía  Pieza GMT	x x x	x	4.55 760 1.25 764.55	g g kWh g	Inserto 3D  Precalentado  Market for Electricity, medium voltage

Tabla 1. Inventario de los procesos involucrados en la manufactura de las piezas experimentales empleando 1, 3 y 5 anillos de estructura impresa en 3D.

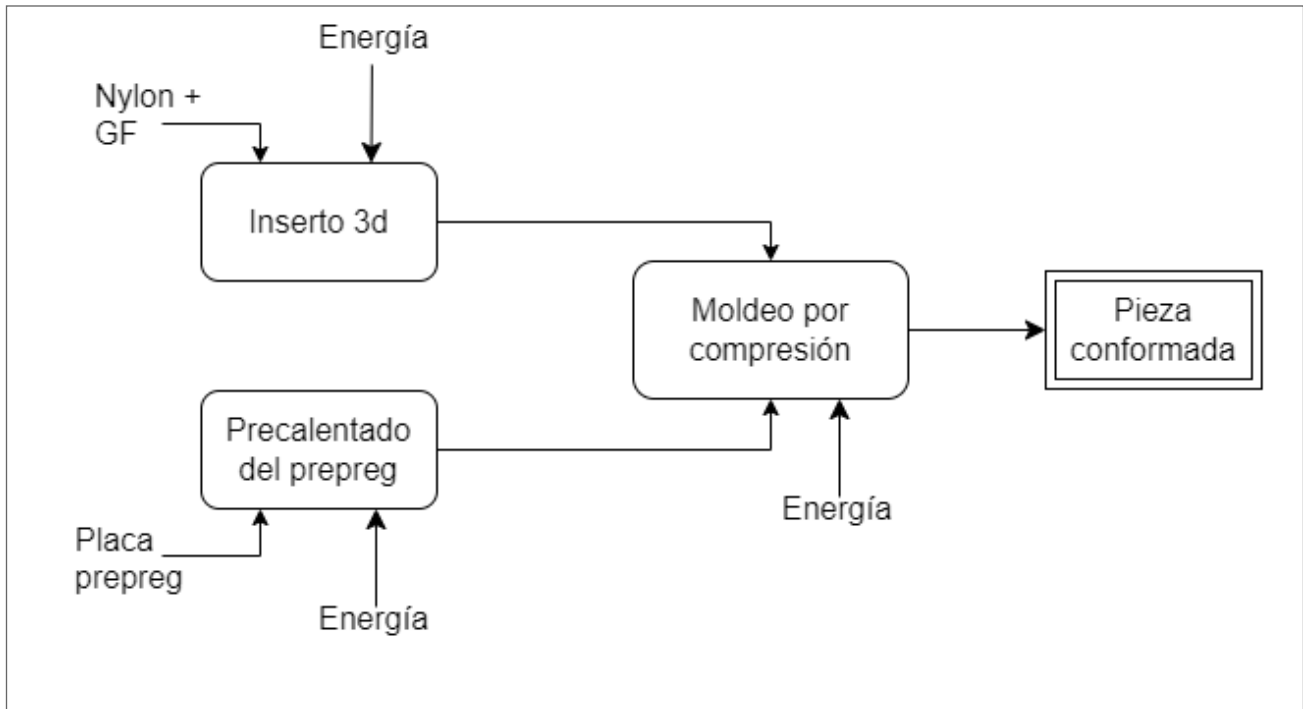


Figura 2. Diagrama de flujo del conformado de la pieza experimental.

GMT	Flujo	Entradas	Salidas	Cantidad	Uds	Proveedor/Fuente
Verte dero	Pieza 5r	x	x	1000	g	Pieza GMT
	Flujo de verteder o ecoinv ent polia mida	x	x	- 0.240	- kg	Ecoinvent landfill specific burdens for polyamide waste
	Glass waste					-
Piróli sis	Pieza 5r	x	<b>x</b>	100	g	Pieza GMT
	Energía	x	<b>x</b>	2.6	kWh	Market for electricity, medium voltage
	CO2		<b>x</b>	45.14	g	
	H2O		<b>x</b>	27.05	g	[7]

Ethylene		<b>X</b>	0.228	g	
Ethane		<b>X</b>	0.152	g	
Propadiene		<b>X</b>	0.076	g	
Propylene		<b>X</b>	0.532	g	
		x	0.304	g	
Butadiene		x	0.456	g	
		x	0.380	g	
Butene		x	0.152	g	
Butane		x	0.228	g	
Isoprene		x	0.076	g	
Pentene		x	0.076	g	
Pentane		x	0.532	g	
Benzene		x	0.152	g	
Hexadiene			0.152	g	
			0.076	g	
Hexene			0.076	g	
Hexane			0.152	g	
Toluene					
Dimethylbenzene					
Heptadiene					

Tabla 2. Inventario comparando los escenarios de fin de vida para la pieza experimental 5r, comparando los impactos asociados a la deposición en vertedero y a la pirólisis del composite. En las salidas del proceso de pirólisis, aquellas resaltadas en negrita pueden ser recuperadas como

productos de valor añadido.

## Interpretación del ciclo de vida

Los ACVs han sido realizados con el software OpenLCA 1.10.3, usando el inventario más actualizado de Ecoinvent 3.9. Los impactos ambientales han sido caracterizados con indicadores midpoint empleando la metodología ReCiPe 2016 Midpoint Hyerarchics. El uso de ReCiPe 2016 frente a otros métodos como CML-baseline permite obtener información relevante sobre las categorías de impacto analizadas teniendo en cuenta el progreso estimado sobre sus reducciones futuras y usar los 18 indicadores específicos de esta metodología.

### 3. Resultados

Primero se han comparado las contribuciones del proceso completo de manufactura a los indicadores de impacto de cada una de las piezas, con un inserto de uno, tres y cinco anillos. Las diferencias de consumo energético adicional y el uso de material empleado para el inserto no son suficientes para afectar a los resultados obtenidos, donde la reducción de peso teórica lograda gracias al inserto resulta en una mejora medioambiental más significativa.

Indicator	5r	3r	1r	Unit
Global warming	6.5702	7.7694	1.77333 $e^1$	kg CO <sub>2</sub> eq
Terrestrial ecotoxicity	1.8730	2.08612	3.78709	kg 1,4-DCB
Fossil resource scarcity	1.79302	2.11857	4.82546	kg oil eq
Marine eutrophication	6.63541 $e^{-4}$	7.89430 $e^{-4}$	1.83827 $e^{-3}$	kg N eq

Tabla 3. Resultados obtenidos en las categorías de Global warming, Terrestrial ecotoxicity, Fossil resource scarcity y Marine eutrophication para el conformado de la pieza experimental.

En la tabla 3 se muestran los resultados numéricos de las categorías de

calentamiento global, ecotoxicidad terrestre, escasez de recursos fósiles y eutroficación marina, que son lineales con la cantidad de material con la cantidad de material preimpregnado usado para la pieza en todos los indicadores. Estas cuatro categorías han sido escogidas por ser las más prominentes en estudios de similar carácter sobre composites poliméricos realizados anteriormente.

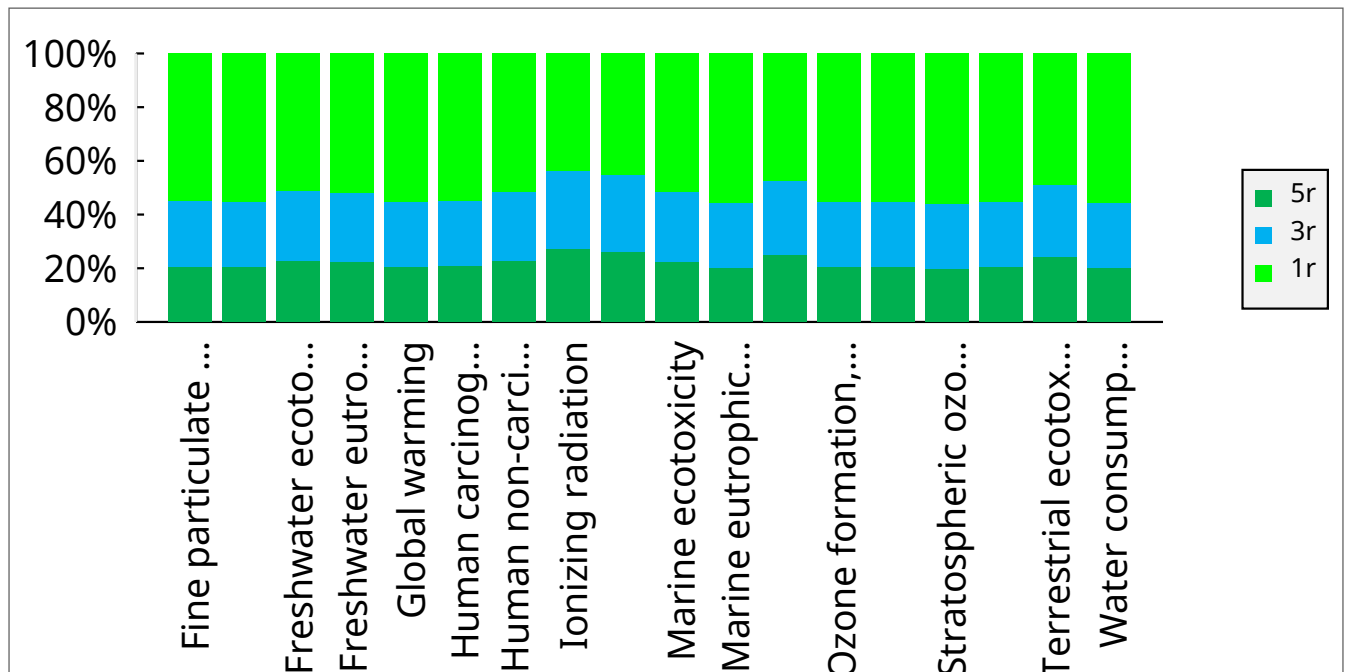


Figura 3. Contribuciones normalizadas de cada proceso de manufactura con un inserto 5r, 3r y 1r sobre los 18 indicadores propios de la metodología ReCiPe 2016.

Se debe destacar la importancia del indicador de Global warming con los kg de dióxido de carbono equivalente para este estudio, siendo el objetivo principal del diseño lightweight y el eje central de los objetivos medioambientales en automoción establecidos por la Unión Europea. De todas maneras, se observan mejoras de similar magnitud en los 18 indicadores.

Los impactos ambientales derivados del fin de vida de un composite de fibra de vidrio y poliamida también han sido analizados, comparando un escenario de deposición en vertedero con el tratamiento mediante pirólisis de alto rendimiento de este mismo residuo.

Indicator	Landfill 5r	Pyrolisis 5r	Unit
Global warming	8.71226	7.63433e <sup>-1</sup>	kg CO <sub>2</sub> eq

Terrestrial ecotoxicity	2.46892	$2.12901e^{-3}$	kg 1,4-DCB
Fossil resource scarcity	2.35753	$2.02499e^{-1}$	kg oil eq
Marine eutrophication	$8.72580e^{-4}$	$8.33546e^{-5}$	kg N eq

Tabla 4. Resultados obtenidos en las categorías de Global warming, Terrestrial ecotoxicity, Fossil resource scarcity y Marine eutrophication para los escenarios de fin de vida de la pieza 5r experimental. Se observa una caída de casi 100 veces menos contribución a la ecotoxicidad terrestre si la pieza es tratada por pirólisis, mientras que en otros indicadores esta reducción llega hasta las 10 veces.

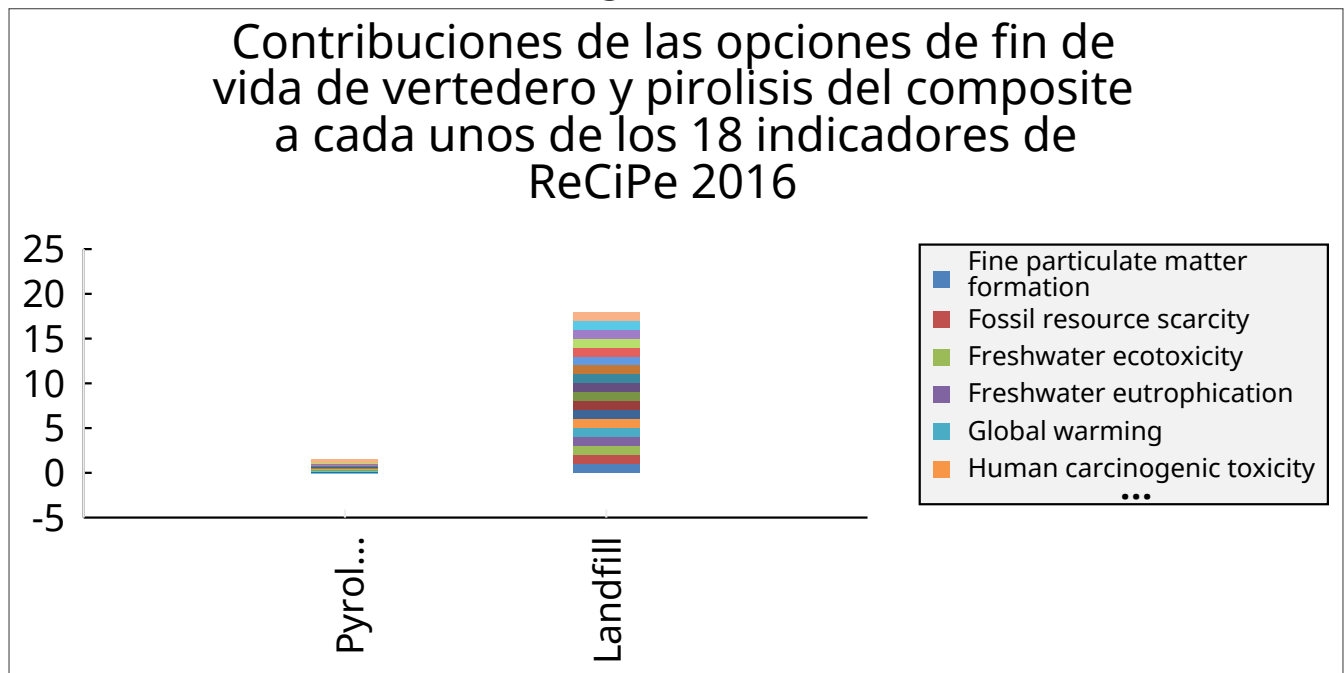


Figura 4. Desglose de los impactos ocasionados por cada uno de los escenarios de fin de vida contemplados para el composite, destacando una reducción notable del impacto en todos los indicadores considerados por ReCiPe2016.

## Conclusiones

Basándonos en los resultados obtenidos a través del análisis de ciclo de vida llevado a cabo empleando la metodología ReCiPe 2016 Midpoint Hierarchic, la optimización de la manufactura y el tratamiento tras el fin de vida de los composites empleados en automoción podría resultar en una mejora sustancial del impacto ambiental de esta.

La mejora de propiedades físicas a través del diseño lightweight resulta en una notable disminución de la cantidad de material necesario para fabricar una misma pieza con propiedades físicas equiparables. Aunque las cifras en las que está basado el estudio actualmente son todavía predicciones teóricas, se espera poder disminuir aún más estas cifras a través de un optimizado aún más exhaustivo. Esto implica una reducción de consumo de materias primas, energía de procesamiento y extracción de materiales en el background de estas piezas de manera significativa, resultando en una mejora en las 18 categorías contempladas.

En cuanto a los escenarios de fin de vida del composite, más mejoras ambientales pueden obtenerse tras un tratamiento de pirólisis que obtenga el máximo valor posible de los residuos generados al fin de vida del composite. En este caso, el tratamiento del residuo mediante pirólisis da unos resultados de varios órdenes de magnitud menores sobre los indicadores de impacto que el desecho sin tratamiento previo en vertedero.

El estudio de la optimización de estos procesos de manufactura y tratamiento de residuo o de la fase de uso en el vehículo todavía puede mejorar más su precisión y sus contribuciones al avance del diseño lightweight a través de la normalización de las propiedades físicas del composite frente a su peso y sus impactos asociados, proyecto colaborativo propuesto para desarrollar sobre la base este mismo estudio con el equipo de la Universidad de Mondragón.

## 4. Agradecimientos

Agradecemos enormemente la ayuda dotada por parte del proyecto de Gobierno Vasco ELKARTEK22/71 y la colaboración entre los equipos de investigación miembros en la Universidad del País Vasco y la Universidad de Mondragón.

## 5. Bibliografía

[1] Rosenthal, S., Maaß, F., Kamaliev, M., Hahn, M., Gies, S., & Tekkaya, A. E. (2020). Lightweight in Automotive Components by Forming Technology. *Automotive Innovation*, 3(3), 195–209. <https://doi.org/10.1007/s42154-020-00103-3>

[2] Kawajiri, K., Kobayashi, M., & Sakamoto, K. (2020). Lightweight materials equal lightweight greenhouse gas emissions?: A historical analysis of greenhouse gases of vehicle material substitution. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 253). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119805>

[3] Zhang, K., Hamidian, A. H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J. K. H., Wu, C., & Lam, P. K. S. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. In *Environmental Pollution* (Vol. 274). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>

[4] Lee, J. M., Lee, C. J., Kim, B. M., & Ko, D. C. (2020). Design of Prepreg Compression Molding for Manufacturing of CFRTP B-pillar Reinforcement with Equivalent Mechanical Properties to Existing Steel Part. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21(3), 545–556. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00265-z>

[5] Law, K. L., & Narayan, R. (2022). Reducing environmental plastic pollution by designing polymer materials for managed end-of-life. In *Nature Reviews Materials* (Vol. 7, Issue 2, pp. 104–116). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00382-0>

[6] Naqvi, S. R., Prabhakara, H. M., Bramer, E. A., Dierkes, W., Akkerman, R., & Brem, G. (2018). A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.013>

[8] Strauss S., Wall L.A. (1958). Pyrolysis of polyamides. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 60, 39-45.