



Universidad de Oviedo

ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

ÁREA DE TECNOLOGÍAS DEL MEDIO AMBIENTE

**ECONOMÍA CIRCULAR Y ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN EQUIPAMIENTOS
DE TRANSPORTE EN EDIFICIOS**

D. COLLADA PEÑA, Sara
TUTOR: D. Fernández Nava, Yolanda

FECHA: JULIO 2025

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado evalúa la viabilidad ambiental de aplicar estrategias de economía circular en el ámbito de los equipos de transporte vertical en edificios, mediante un análisis comparativo del ciclo de vida (ACV) de un ascensor nuevo y otro reacondicionado. El estudio se ha desarrollado en colaboración con la empresa TK Elevator y sigue los requisitos metodológicos establecidos por las normas ISO 14040 e ISO 14044, utilizando el software LCA Calculator como herramienta de modelado ambiental.

El caso de estudio se basa en el modelo EOX, un ascensor eléctrico que incorpora tecnologías de eficiencia energética y conectividad digital. Se trata de una solución optimizada para edificios residenciales y de pequeña altura, diseñada para minimizar el consumo de energía en reposo y reducir la huella de carbono desde su concepción.

El escenario reacondicionado contempla la reutilización de varios componentes clave del sistema original: guías, amortiguadores, contrapeso y puertas de pasillo, todos ellos en condiciones óptimas para una segunda vida útil. Esta estrategia permite evitar procesos de fabricación intensivos en materiales y energía, prolongando además la vida útil del sistema.

Se han comparado ambos escenarios considerando las etapas de fabricación, uso y fin de vida, evaluando, entre otras, categorías de impacto principales como el calentamiento global (GWP), el consumo de recursos no renovables y la generación de residuos.

Los resultados cuantitativos obtenidos muestran que el ascensor reacondicionado permite:

- Reducir el potencial de calentamiento global (GWP) en un 34,9 %, como consecuencia de la menor carga ambiental asociada a la fabricación de nuevos componentes.
- Disminuir el consumo de recursos no renovables en un 34 %, tanto en términos de energía fósil como de mineras y metales, gracias a la reutilización de materiales estructurales.
- Limitar los impactos en otras categorías ambientales clave, con reducciones del 32% en acidificación (AP), 30 % en eutrofización de agua dulce, un 34 % en eutrofización marina y 34,5 % en eutrofización terrestre, reflejando una mejora garantizada en la mayoría de los indicadores evaluados.

Se concluye que la modernización parcial del ascensor mediante reutilización de componentes es una estrategia técnica y ambientalmente eficaz, que no compromete la funcionalidad del equipo. El uso del ACV ha permitido cuantificar de forma objetiva los beneficios de esta práctica, validando su aplicabilidad dentro de los principios de economía circular en el sector de la edificación.

Abstract

This Final Degree Project evaluates the environmental feasibility of applying circular economy strategies to vertical transportation systems in buildings, through a comparative Life Cycle Assessment (LCA) of a new elevator and a refurbished one. The study was carried out in collaboration with TK Elevator and follows the methodological requirements defined by ISO 14040 and ISO 14044 standards, using LCA Calculator software for environmental modeling.

The case study focuses on the EOX model, an electric elevator designed for low-rise residential buildings, which integrates energy-efficient technologies and digital connectivity. The system is optimized to minimize standby energy consumption and reduce its carbon footprint from the design phase.

The refurbished scenario includes the reuse of four key components from the original installation: guide rails, buffers, counterweight, and hoistway doors, all in optimal condition for extended use. This approach reduces the need for energy- and material-intensive manufacturing processes while extending the product's useful life.

The life cycle of both systems was evaluated across the production, use, and end-of-life stages. Three key impact categories were assessed: Global Warming Potential (GWP), Primary Energy from Non-Renewable Resources, and waste generation.

The results show that the refurbished elevator achieves:

- A 34,9 % reduction in Global Warming Potential (GWP), due to the avoided environmental burden associated with manufacturing new components.
- A 34 % decrease in the consumption of non-renewable resources, including both fossil energy and mineral/metal depletion, thanks to the reuse of structural materials.
- A general improvement across other environmental impact categories, with reductions of 32% in acidification (AP), 30% in freshwater eutrophication, 34% in marine eutrophication, and 34.5% in terrestrial eutrophication, demonstrating broad environmental benefits.

It is concluded that partial modernization through component reuse is a technically and environmentally effective strategy that preserves system functionality. The application of LCA has enabled a quantitative and objective evaluation of this approach, supporting its alignment with circular economy principles in the building sector.



ÍNDICE

1.	Introducción y Objetivos	12
1.1.	PRESENTACIÓN DEL TRABAJO	12
1.2.	OBJETIVOS A CONSEGUIR	14
1.3.	METODOLOGÍA DE ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO.....	15
1.4.	ANTECEDENTES: MARCO AMBIENTAL Y JUSTIFICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA 16	
2.	Economía circular	19
2.1.	DEFINICIÓN Y CONCEPTO DE ECONOMÍA CIRCULAR.....	19
2.2.	DIFERENCIA ENTRE ECONOMÍA CIRCULAR Y LINEAL	20
2.3.	BARRERAS A LA VIABILIDAD DE LA ECONOMÍA CIRCULAR	21
2.4.	TÉCNICAS PARA LA POTENCIACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR.....	22
2.5.	AGENDA 2030: ESTADO ACTUAL DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN ESPAÑA	24
3.	Análisis de ciclo de vida.....	29
3.1.	DEFINICIÓN, ORIGEN Y EVOLUCIÓN	29
3.2.	METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	30
3.2.1.	ETAPAS EN LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA	31
3.2.2.	MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA	31
3.3.	PRINCIPALES HERRAMIENTAS PARA LA REALIZACIÓN DE UN ACV.....	33
3.4.	IMPLEMENTACIÓN DEL ACV EN EL SECTOR DE LA EDIFICACIÓN	35
3.5.	DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTO	40
4.	Caso práctico: Aplicación del ACV al proceso de fabricación/modernización de un ascensor	42
4.1.	CASO DE ESTUDIO	42
4.2.	ESCENARIOS ESTUDIADOS	45
4.3.	METODOLOGÍA DE ACV APLICADA AL CASO DE ESTUDIO	46
4.3.1.	DEFINICIÓN DEL OBJETIVO.....	46
4.3.2.	UNIDAD FUNCIONAL	47
4.3.3.	LÍMITES DEL SISTEMA.....	47
4.3.4.	OTRAS ESPECIFICACIONES RELATIVAS AL ALCANCE DEL ACV.....	50
4.3.5.	SOFTWARE Y BASE DE DATOS UTILIZADA.....	50
4.3.6.	CATEGORÍAS DE IMPACTO SELECCIONADAS PARA EL ESTUDIO	51
4.4.	ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA.....	53
4.4.1.	ETAPA DEL PRODUCTO	53
4.4.2.	ETAPA DE CONSTRUCCIÓN	56
4.4.3.	ETAPA DE UTILIZACIÓN.....	57

4.4.4.	ETAPA DE FINALIZACIÓN DE VIDA ÚTIL	58
4.4.5.	POTENCIAL DE REUTILIZACIÓN, RECUPERACIÓN Y RECICLAJE.....	59
4.5.	EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA (EICV): RESULTADOS.....	60
4.5.1.	PERFIL AMBIENTAL DEL ESCENARIO DE REFERENCIA (ASCENSOR NUEVO).....	60
4.5.2.	EVALUACIÓN DE RESULTADOS POR CATEGORÍA DE IMPACTO (ASCENSOR NUEVO) 63	
4.6.	PERFIL AMBIENTAL DEL ASCENSOR REHABILITADO Y ESTUDIO COMPARATIVO.....	70
5.	Conclusiones.....	80
6.	Referencias	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones totales de gases de efecto invernadero por país de la UE. Fuente: Parlamento Europeo	17
Figura 2. Disminución de emisión de gases efecto invernadero en España. Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE, 2023)	18
Figura 3. Objetivos de desarrollo sostenible	25
Figura 4. Etapas ciclo de vida del ascensor	37
Figura 5. Partes ascensor EOX	44
Figura 6. Balance de materiales del ascensor EOX	54
Figura 7. Porcentajes del análisis de ciclo de vida para el Escenario de Referencia	61
Figura 8. Contribución por módulo de ciclo de vida al Potencial de Calentamiento Global en el Escenario de Referencia	64
Figura 9. Contribución por módulo de ciclo de vida al Potencial de Acidificación para el Escenario de Referencia	65
Figura 10. Contribución por módulo a la Eutrofización de Agua Dulce en el Escenario de Referencia	66
Figura 11. Contribución por módulo a la Eutrofización Marina en el Escenario de Referencia	67
Figura 12. Contribución por módulo a la Eutrofización Terrestre en el Caso Escenario de Referencia	68
Figura 13. Contribución por módulo al Agotamiento de Recursos Minerales y Metálicos en el Escenario de Referencia	69
Figura 14. Contribución por módulo al Agotamiento de Recursos Fósiles en el Escenario de Referencia	70
Figura 15. Porcentajes del análisis de ciclo de vida para el Ascensor Reacondicionado	71
Figura 16. Comparación de GWP en ambos casos	73
Figura 17. Comparación AP en ambos escenarios	74
Figura 18. Comparación EP agua dulce en ambos escenarios	75
Figura 19. Comparativa EP-marine en ambos escenarios	76
Figura 20. Comparativa AP-terrestrial en ambos escenarios	77
Figura 21. Comparativa ADP-fossil en ambos casos	78
Figura 22. Comparativa ADP-minerals/metals en ambos casos	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa economía lineal y circular	20
Tabla 2. Etapas del ciclo de vida consideradas para edificios, según la norma UNE-EN 15978:2011	37
Tabla 3. Diferencias entre ACV y EPD	41
Tabla 4. Especificaciones del ascensor evaluado según los Requisitos Particulares Complementarios. En la columna central se encuentran los valores medios utilizados.....	45
Tabla 5. Límites del sistema para un ascensor	49
Tabla 6. Explicación categorías de impacto evaluadas	52
Tabla 7. Rendimiento de transporte para categorías de uso seleccionadas según PCRs	55
Tabla 8. Resultados por categoría de impacto en el Escenario de Referencia	60
Tabla 9. Resultados por categoría de impacto para el escenario reacondicionado	71

GLOSARIO

Actualizaciones OTA (Over-the-air): se trata de un método para distribuir software, firmware o ajustes de configuración a dispositivos electrónicos de forma remota, sin necesidad de conectar físicamente el equipo a un ordenador o a un centro de servicio.

Análisis de Ciclo de Vida (ACV): proceso que comprende la recopilación y evaluación de los aportes, resultados y los posibles impactos medioambientales de un sistema de productos a lo largo de su ciclo de vida. (ISO 14040:2006, sección 3.2).

Asignación: división de los flujos de entrada o salida de un proceso o sistema de productos entre el sistema de productos en estudio y uno o más sistemas de productos adicionales (ISO 14040:2006, sección 3.17).

Ciclo de vida: término referido al conjunto de etapas y cambios que experimenta un organismo, un proyecto, un producto o cualquier entidad a lo largo del tiempo, desde su inicio hasta su final. (ISO 14040:2006, sección 3.1). Esto incluye todos los materiales y consumos de energía, así como las emisiones al aire, tierra y agua.

Declaración ambiental del producto (DAP): también conocida por sus siglas en inglés como EPD (Environmental Product Declaration), es un documento verificado y registrado que proporciona información cuantificada y objetiva sobre el impacto ambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida.

Economía circular (EC): modelo económico que busca optimizar el uso de recursos, reducir residuos y alargar la vida útil de los productos. Se basa en principios como la reutilización, el reciclaje, la reparación y el rediseño, con el objetivo de crear un sistema sostenible que minimice el impacto ambiental y fomente la eficiencia en todos los procesos productivos. A diferencia del modelo lineal tradicional (producir-usar-deschegar), la economía circular promueve un ciclo continuo de aprovechamiento de materiales.

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV): fase del análisis del ciclo de vida destinada a comprender y evaluar la magnitud y significado de los posibles impactos ambientales para un sistema de producto a lo largo del ciclo de vida del producto (ISO 14040:2006, sección 3.4).

Gases de Efecto Invernadero (GEI): compuestos gaseosos que, al acumularse en la atmósfera, atrapan el calor irradiado por la superficie terrestre, contribuyendo al calentamiento global. Entre los principales se encuentran el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (N₂O) y gases industriales como los hidrofluorocarbonos (HFC). Su concentración está directamente relacionada con actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la ganadería o los procesos industriales.

Huella ecológica: indicador ambiental que mide el impacto que una actividad, individuo o comunidad ejerce sobre el entorno, expresado en superficie de tierra y agua necesaria para producir los recursos consumidos y absorber los residuos generados. Permite evaluar la sostenibilidad de estilos de vida, procesos productivos o políticas públicas, en relación con la capacidad regenerativa del planeta.

Internet de las cosas (IoT): es una red global de objetos físicos (como dispositivos, vehículos, edificios y electrodomésticos) que están conectados a Internet y pueden recopilar y enviar datos. Estos objetos pueden tener sensores, software y capacidad de procesamiento integrados que les permite interactuar entre sí y con el entorno.

Interpretación del ciclo de vida: fase de la evaluación del ciclo de vida en la que los resultados tanto del análisis del inventario como de la evaluación de impacto, o de ambos, se evalúan en relación con los objetivos y el alcance definidos con el fin de llegar a conclusiones y recomendaciones (ISO 14040:2006, sección 3.5.).

Inventario de Ciclo de Vida (ICV): fase de la evaluación de ciclo de vida que implica la recopilación y cuantificación de aportes y resultados para un producto a lo largo de su ciclo de vida (ISO 14040:2006, sección 3.3).

Objetivos de Desarrollo Mundial (ODM): fueron una serie de metas globales establecidas por la comunidad internacional con el propósito de mejorar las condiciones sociales, económicas y medioambientales en los países en vías de desarrollo. Adoptados en el año 2000 por los Estados miembros de las Naciones Unidas, estos ocho objetivos sirvieron como una hoja de ruta para combatir la pobreza extrema, reducir la mortalidad infantil, garantizar la educación primaria universal, promover la igualdad de género, y fomentar el desarrollo sostenible, entre otros desafíos prioritarios. Su periodo de aplicación comprendió hasta el año 2015, momento en el cual fueron sucedidos por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con un enfoque más amplio y actualizado.

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): conjunto de 17 metas globales adoptadas por las Naciones Unidas en 2015 dentro de la agenda 2030. Tienen como finalidad erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todas las personas, promoviendo un desarrollo equilibrado desde las dimensiones económica, social y ambiental. Cada objetivo incluye metas específicas que deben alcanzarse antes de 2030.

Reglas de Categoría de Producto (RCP): conjunto de requisitos específicos que complementan las normas generales de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para una categoría concreta de productos. Las RCP definen como debe aplicarse el método de ACV a un determinado grupo de productos, estableciendo criterios metodológicos comunes como los límites del sistema, las unidades funcionales, los módulos del ciclo de vida a considerar, las categorías de impacto relevantes y los requisitos de calidad de los datos. Su propósito es asegurar la comparabilidad y coherencia entre Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) pertenecientes a una misma categoría. Las RCP se desarrollan conforme a las directrices de la norma ISO 14025 y, en el ámbito de la construcción, también según la EN 15804.

Requisitos Particulares Complementarios (*Particular Complementary Requirements, PCRs*): conjunto de requisitos técnicos específicos que se establecen para un producto o categoría de productos, complementando los requisitos generales establecidos en la legislación o en normas armonizadas. Los PCRs tienen como objetivo garantizar que los productos cumplan con requerimientos adicionales relacionados con aspectos como la seguridad, la salud, la accesibilidad, la eficiencia energética o la protección del medio ambiente.

Revisión crítica: proceso destinado a garantizar la coherencia entre una evaluación del ciclo de vida y los principios y requisitos de las Normas Internacionales sobre evaluación del ciclo de vida (ISO 14040:2006, sección 3.45).

Unidad Funcional (FU): rendimiento cuantificado de un sistema de productos utilizado como unidad de referencia (ISO 14040:2006, sección 3.20).

1. Introducción y Objetivos

1.1. PRESENTACIÓN DEL TRABAJO

Este Trabajo Fin de Grado, ha sido realizado en colaboración con la empresa TK Elevator, y en él se evalúa mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida el comportamiento ambiental de un ascensor, en concreto el modelo EOX de la citada empresa, teniendo en cuenta dos escenarios: un ascensor nuevo y otro rehabilitado con piezas provenientes reutilizadas. Dado que el presente trabajo se ha realizado en colaboración con una empresa, algunos de los datos utilizados son confidenciales y, por tanto, no pueden ser publicados ni compartidos íntegramente por razones de privacidad y acuerdos de confidencialidad.

TK Elevator es uno de los principales proveedores mundiales de tecnología para ascensores y escaleras mecánicas, ocupando las posiciones líderes del mercado en América, Europa y África, y contando con una sólida plataforma para capturar oportunidades de crecimiento adicional en la región de Asia Pacífico. Diseñan, fabrican, instalan, dan servicio y modernizan ascensores de pasajeros y carga, escaleras mecánicas, pasillos rodantes, pasarelas de embarque de pasajeros, y elevadores de sillas y plataformas, cubriendo todo el ciclo de vida del producto; desde la instalación inicial hasta el mantenimiento y la instalación.

Haciendo uso de su legado de ingeniería alemana, son líderes en innovación en la era digital. Aprovechan las tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) para capturar datos y hacer recomendaciones de reparación en tiempo real. El objetivo es prestar un mejor servicio a las sociedades que se urbanizan rápidamente, a la vez que ofrecen una seguridad y eficiencia del producto cada vez mejores. Con alrededor de 1.000 ubicaciones en todo el mundo, clientes en más de 100 países, unas ventas superiores a los 8.5 billones de euros en el año fiscal 2021/2022 y más de 50.000 empleados, el negocio se caracteriza por una red global de ventas y servicios que garantiza una proximidad óptima a los clientes. (Sustainability Report, TKE)

El modelo de negocio basado en el ciclo de vida permite en muchas empresas aumentar sus actividades de mantenimiento. De media, convierten del 70% al 80% de las nuevas instalaciones de ascensores y escaleras en contratos de servicio continuo. Esto les proporciona una fuente estable de ventas recurrentes; en los últimos dos años fiscales han logrado retener a más del 90% de los clientes del área de servicios. También han aumentado el número de contratos de mantenimiento y modernización para contratos que originalmente habían sido tanto de la empresa como de otros fabricantes. Los negocios de mantenimiento y modernización representaron el 57% de las ventas y la mayor parte del beneficio bruto en el año fiscal 2021/2022; generaron ventas recurrentes y altos márgenes de beneficio para el grupo, además de crear buenas perspectivas para las ganancias futuras. Tienen altas tasas de conversión y retención y cultivan relaciones duraderas con los clientes.

Sin embargo, debido al carácter global de la empresa y la alta diversificación, el conjunto de los 10 mayores clientes apenas representa el 3% del cómputo total de ingresos anuales. (TK Elevator, 2023).

TK Elevator tiene clientes en todo el mundo, lo que se refleja en su huella de fabricación desde América hasta Europa y Asia. En todas sus instalaciones aprovechan su experiencia y conocimientos en ingeniería y fabricación de soluciones de movilidad urbana para desarrollar nuevas innovaciones y mejorar continuamente los productos existentes.

Los principales mercados de ventas son atendidos por instalaciones locales de fabricación y se complementan con una red de servicio global con alrededor de 1000 sucursales repartidas por los cinco continentes.

Los productos de TK Elevator se caracterizan por su larga vida útil, la cual puede extenderse aún más mediante un mantenimiento y modernización adecuados. En consecuencia, tanto los productos nuevos como las soluciones de modernización apoyan la transición hacia una economía circular y ayudan a mejorar el desempeño ambiental de la infraestructura existente, abriendo así nuevas oportunidades de negocio para la industria de los ascensores.

Más del 30% de todos los ascensores instalados a nivel mundial tienen más de 20 años. En mercados maduros como Europa y Norte América, los ascensores con más de 20 años representan incluso más del 50% de los instalados. La modernización de estos equipos permite prolongar su vida útil, reducir el consumo energético y disminuir la cantidad de materiales necesarios en comparación con una sustitución completa por unidades nuevas.

Para dar respuesta a esta demanda, se ofrecen kits de modernización personalizados, tanto para los modelos propios de la marca como para equipos de terceros, y se continúan desarrollando nuevas soluciones de forma continua para ampliar la oferta.

Al modernizar ascensores, solo se reemplazan algunos de sus componentes, lo que permite reducir el uso de materiales y, por tanto, también el carbono incorporado en los edificios. Además, se integran nuevas tecnologías orientadas a la mejora de la eficiencia energética, lo que contribuye a una disminución del consumo energético y a una reducción significativa de la huella de carbono global del edificio. De esta manera, es posible mejorar el desempeño ambiental de los clientes de la empresa y ayudarles a alcanzar sus objetivos de sostenibilidad.

Respecto al modelo de ascensor que es objeto del presente TFG, EOX es el nuevo modelo de ascensor desarrollado por la empresa, ecológico, eficiente y nativo digital.

Este modelo ha sido lanzado en octubre de 2022. Si bien tanto la sostenibilidad como las características digitales de vanguardia han sido un estándar para los segmentos de mercados premium y de gran altura, con EOX se están llevando estos beneficios al mercado estandarizado de media y baja altura.

EOX cuenta con una tecnología de tracción por correa de bajo consumo y un accionamiento regenerativo que recupera energía cada vez que un ascensor frena, devolviéndola a la red eléctrica del edificio para que pueda ser utilizada por otros ascensores o consumidores. Además de los modos estándar de suspensión y espera, EOX cuenta con un exclusivo modo ecológico que “aprende” y se adapta a los patrones de tráfico de un edificio. Durante los periodos de tráfico reducido, la velocidad y la aceleración del ascensor se reducen al 80% de los valores nominales y se pueden ajustar para adaptarse a las preferencias. El diseño de bajo consumo de los ascensores EOX significa que consumen hasta un 28% menos de energía mientras se desplazan por el hueco y los califica para la clasificación de eficiencia energética más alta, es decir, la Clase A según la definición de la norma ISO 25745-2.

Para garantizar que la base digital de EOX alcanza los estándares más altos posibles, se asociaron con Microsoft para crear la infraestructura en la nube y con NVIDIA para diseñar el núcleo del procesador. El hardware EOX está concebido para admitir mejoras futuras, incluidas capacidades como la inteligencia artificial y aprendizaje automático. Sensores inteligentes recopilan y transmiten datos en tiempo real para una monitorización avanzada; esto permite identificar y solucionar cualquier problema potencial de raíz antes de que ocurra, minimizando así las reparaciones no programadas y las emisiones a ellos asociadas. Además, EOX cuenta con una cámara dentro de la cabina que funciona como sensor óptico y puede desempeñar un papel importante en la mejora de la seguridad de los pasajeros en situaciones de emergencia.

EOX se lanzó en octubre de 2022 en varios países europeos, entre ellos Francia, Italia, Polonia, Reino Unido e Irlanda. Posteriormente, su implantación se ha ampliado progresivamente a otros mercados, incluyendo Alemania, donde se introdujo oficialmente en julio de 2023, y España, donde comenzó a estar disponible en 2024.

1.2. OBJETIVOS A CONSEGUIR

Distinguiremos de forma clara y concisa entre objetivos primarios y secundarios. En el primer grupo y como principales objetivos a conseguir en este trabajo se encuentran:

- Ver la influencia en el cambio climático de la instalación de un ascensor nuevo frente a uno reacondicionado, desde el punto de vista de consumo de recursos tanto energéticos como materiales.

- Entender la metodología del ACV como herramienta de decisión, mejora del proceso y evaluación del impacto medioambiental.

- Enfocar los resultados obtenidos hacia el sector de la edificación, teniendo en consideración si realmente merece la pena.

-Establecer medidas y estrategias, con aplicación en cualquiera de las fases del ciclo de producción de materiales, que impliquen una reducción del impacto ambiental sin afectar la calidad del producto.

-Aplicar el análisis de ciclo de vida a un caso real, de manera que la empresa colaboradora, pueda utilizar el informe elaborado para valoraciones de producto internas.

Con carácter secundario, se establecen los siguientes objetivos:

-Dar a conocer más opciones que la instalación de ascensores completamente nuevos.

- Conocer la participación energética de los materiales dentro del ciclo de vida completo de un ascensor y compararlo con el resto de las etapas, así como con el modelo actual de instalación.

-Indagar en el procedimiento a seguir para un correcto análisis de ciclo de vida.

-Estudiar si los métodos de análisis presentes cuantifican y evalúan los impactos acordes a la realidad.

-Dar a conocer los beneficios tanto medioambientales como económicos para la divulgación y aplicación práctica de esta herramienta.

1.3. METODOLOGÍA DE ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO

Para la realización de este TFG se ha utilizado una herramienta informática especializada en Análisis de Ciclo de Vida. Para la realización del Inventario del Ciclo de Vida se ha realizado la recopilación de datos técnicos del citado ascensor, provenientes de la base de datos de la empresa. Del mismo modo, se han consultado artículos técnicos y publicaciones de autores expertos en la materia. Esta información quedará adaptada de forma que se exprese de una forma concisa en el presente documento sin incluir datos que puedan afectar la confidencialidad del producto. Cabe destacar que este documento es el resultado de un intercambio académico entre la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón y la empresa TK Elevator, la cual ha proporcionado tanto las herramientas como los datos necesarios para esta elaboración.

Tras un inicio teórico donde se hace una pequeña introducción de los datos a tratar, estos conocimientos se aplican a un caso práctico de comparativa entre dos escenarios para finalmente proceder a analizarlos y estudiar la viabilidad de ambos.

1.4. ANTECEDENTES: MARCO AMBIENTAL Y JUSTIFICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

En las últimas décadas, los desafíos ambientales derivados del modelo lineal de producción y consumo han adquirido una urgencia creciente a nivel europeo y nacional. Este modelo, basado en la extracción intensiva de materias primas, su transformación en productos y su posterior descarte como residuos, ha demostrado ser insostenible tanto ecológica como económicamente. El incremento acumulado de residuos, el agotamiento de recursos naturales no renovables y el agravamiento del cambio climático constituyen externalidades negativas que exigen una transición hacia modelos circulares y de mayor eficiencia en el uso de los recursos. En este contexto, el análisis del ciclo de vida (ACV) surge como una herramienta clave para cuantificar los impactos ambientales de productos y servicios a lo largo de todas sus etapas —desde la cuna hasta la tumba—, permitiendo identificar puntos críticos y oportunidades de mejora en términos de sostenibilidad.

Europa genera más de 2200 millones de toneladas de residuos anualmente, según datos de Eurostat (2024), y sólo alrededor del 40 % de estos se reciclan. En España, la generación total de residuos en 2022 ascendió a 110,1 millones de toneladas, siendo el sector de la construcción y demolición el principal generador, seguido por la industria manufacturera y los residuos domésticos (INE, 2023). Esta cifra representa un aumento del 5,4 % respecto al año anterior, lo que indica una tendencia regresiva en la gestión ambiental eficiente. A pesar de los avances legislativos en materia de economía circular —como la Estrategia Española de Economía Circular (España Circular 2030)—, los niveles de reciclaje, reutilización y valorización energética continúan siendo insuficientes para frenar la acumulación de residuos en vertederos, que siguen siendo el principal destino final de los residuos sólidos urbanos.

En paralelo, el consumo de recursos materiales sigue una trayectoria de desacoplamiento parcial respecto al crecimiento económico. En España, la productividad material, medida como la relación entre PIB y consumo doméstico de materiales, ha mejorado significativamente desde 2008, alcanzando los 2,8 euros/kg en 2022 (INE, 2023). Sin embargo, la demanda de materiales primarios —especialmente minerales metálicos y productos derivados del petróleo— persiste en niveles elevados, sobre todo en sectores como la edificación, la movilidad urbana y la fabricación de maquinaria industrial, donde el reciclaje de componentes todavía se encuentra limitado por barreras tecnológicas y logísticas.

En lo que respecta a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y particularmente al dióxido de carbono (CO₂), el panorama es ambivalente. España ha experimentado una reducción del 36 % en sus emisiones de CO₂ desde 2005 (Figura 2), principalmente por la descarbonización del sector eléctrico y la desactivación progresiva del carbón. Sin embargo, las emisiones del sector transporte —especialmente terrestre— han seguido aumentando, alcanzando casi un tercio del total nacional en 2024 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024). Esta situación refleja la persistencia de cuellos de botella

estructurales en la transición ecológica, y pone de manifiesto la necesidad de intervenir de forma integral en todos los sistemas productivos, incluidos aquellos considerados infraestructurales, como los sistemas de elevación vertical (ascensores).

Los ascensores, si bien no son los principales generadores de impactos ambientales en términos absolutos, sí representan un caso paradigmático desde el punto de vista del Análisis de Ciclo de Vida. Están compuestos por una combinación de materiales altamente intensivos en emisiones durante su fabricación (acero, aluminio, cobre, plásticos técnicos) y consumen energía eléctrica durante su fase de uso, lo que implica emisiones indirectas en función del mix energético nacional. Además, su mantenimiento, modernización y gestión al final de su vida útil plantean retos logísticos y ambientales relevantes, dado el volumen y la composición de sus residuos. Evaluar estos impactos bajo una perspectiva holística no solo permite tomar decisiones más informadas en términos de diseño sostenible, sino que también alinea el producto con los principios de la economía circular y la responsabilidad extendida del productor.

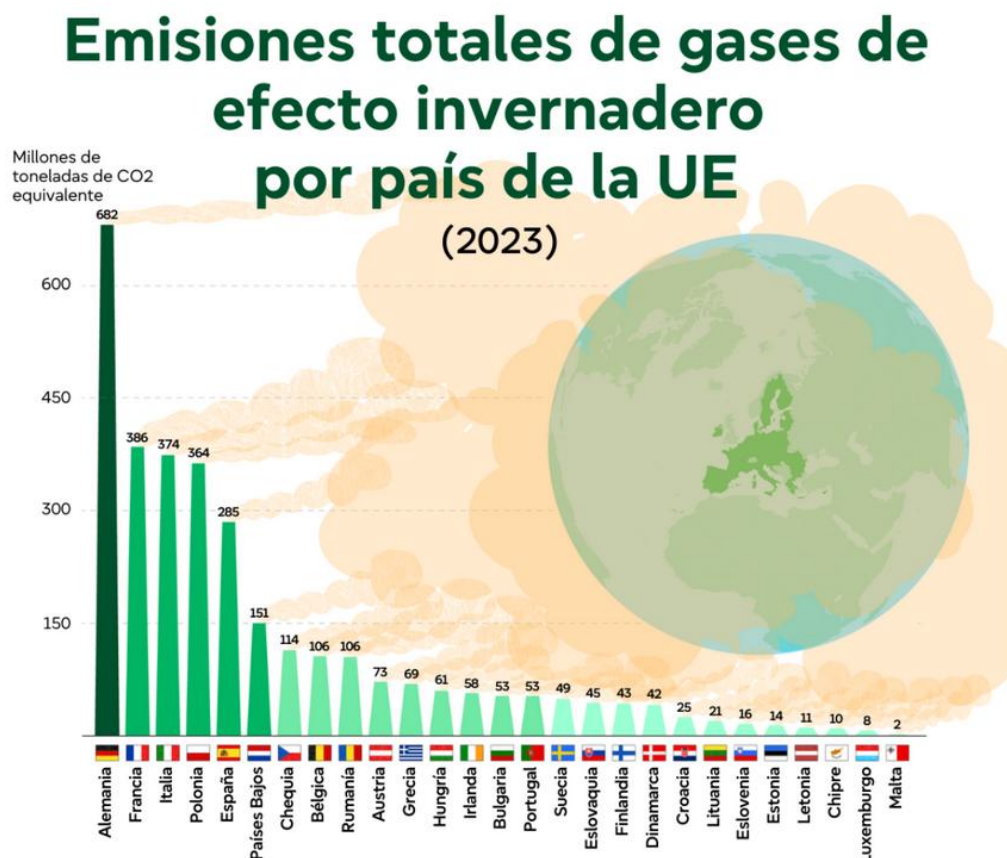


Figura 1. Emisiones totales de gases de efecto invernadero por país de la UE. Fuente: Parlamento Europeo

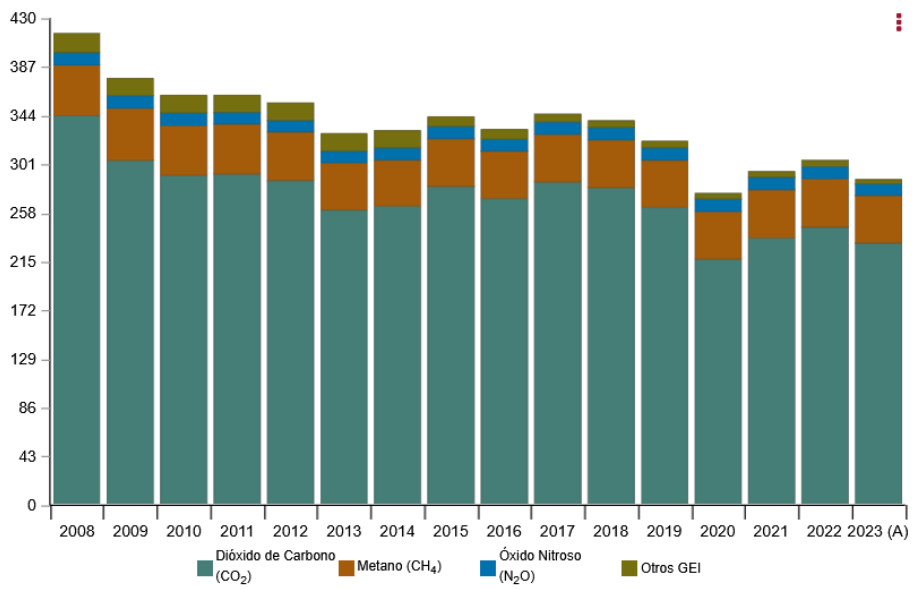


Figura 2. Disminución de emisión de gases efecto invernadero en España. Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE, 2023)

2. Economía circular

2.1. DEFINICIÓN Y CONCEPTO DE ECONOMÍA CIRCULAR

La economía circular es un modelo económico, productivo y de consumo que busca preservar el valor de los recursos, materiales y productos el mayor tiempo posible, en contraste con el modelo lineal tradicional basado en la secuencia "extraer–producir–usar–desechar". En un sistema circular, los residuos se convierten en recursos, y los ciclos de vida de los productos se prolongan mediante la reutilización, reparación, reacondicionamiento, remanufactura y reciclaje.

En términos generales, la economía circular se fundamenta en tres principios esenciales, según la Fundación Ellen MacArthur (2013):

1. Diseñar para eliminar residuos y contaminación desde el origen.
2. Mantener productos y materiales en uso el mayor tiempo posible.
3. Regenerar los sistemas naturales.

Este enfoque promueve un uso más eficiente de los recursos naturales, una menor dependencia de materias primas vírgenes y una reducción significativa de impactos ambientales como el cambio climático, la contaminación y la pérdida de biodiversidad. Desde la perspectiva de la ingeniería, este paradigma requiere aplicar conceptos de ecodiseño, modularidad, facilidad de desmontaje y recuperación de materiales, además de integrar criterios ambientales en las fases iniciales del desarrollo de productos y procesos.

La economía circular no solo tiene beneficios ambientales, sino también económicos y sociales. Entre sus ventajas destacan la reducción de costes por ahorro de materiales, el fomento de la innovación en productos y modelos de negocio, y la generación de empleo verde. A nivel industrial, permite optimizar procesos mediante el diseño para la durabilidad, eficiencia energética y posibilidad de actualización de los equipos a lo largo del tiempo.

En este contexto, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se convierte en una herramienta fundamental, ya que permite cuantificar de manera objetiva y estandarizada los impactos ambientales de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta el fin de su vida útil. Las normas ISO 14040 e ISO 14044 establecen el marco metodológico del ACV, proporcionando un enfoque técnico que permite comparar alternativas y tomar decisiones informadas en el marco de una estrategia de economía circular.

De hecho, la integración de ACV en los procesos de diseño y desarrollo industrial permite identificar oportunidades de mejora ambiental en todas las etapas del ciclo de vida, desde la selección de materiales hasta la gestión del producto al final de su vida útil. Este enfoque

facilita la transición hacia modelos circulares, permitiendo a las empresas reducir su huella ambiental y cumplir con normativas y políticas como el Pacto Verde Europeo y el Plan de Acción para la Economía Circular de la Unión Europea (European Commission, 2020).

Además, el concepto de economía circular está estrechamente alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, especialmente con el ODS 12: Producción y consumo responsables, así como con los ODS relacionados con el clima, la energía, la innovación y el trabajo decente.

2.2. DIFERENCIA ENTRE ECONOMÍA CIRCULAR Y LINEAL

La economía lineal ha sido el modelo económico dominante desde la Revolución Industrial. Se basa en una secuencia tradicional de etapas: extracción de recursos naturales, transformación en productos, uso por parte del consumidor y eliminación como residuo (take–make–dispose). Este modelo, aunque eficaz en contextos de disponibilidad abundante de recursos y energía barata, presenta serias limitaciones en términos de sostenibilidad ambiental, eficiencia de recursos y generación de residuos (Bocken et al., 2016).

En contraste, la economía circular surge como una alternativa regenerativa y restaurativa, orientada a cerrar los ciclos de materiales y energía. En lugar de desechar productos al final de su vida útil, este modelo propone su reintegración en el sistema económico mediante prácticas como la reutilización, el reciclaje, la remanufactura, el ecodiseño y la valorización energética. El objetivo principal es mantener el valor de los materiales y productos el mayor tiempo posible, reduciendo al mínimo la extracción de nuevas materias primas y la generación de residuos (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

En la Tabla 1 se resumen las principales diferencias entre ambos enfoques:

Tabla 1. Comparativa economía lineal y circular

Aspecto	Economía lineal	Economía circular
Modelo de flujo	Abierto y unidireccional	Cerrado y cíclico
Uso de recursos	Intensivo, basado en materias primas vírgenes	Eficiente, prioriza el uso de materiales reciclados o renovables
Gestión del producto al final de su vida útil	Eliminación (vertedero o incineración)	Reutilización, reciclaje, remanufactura
Generación de residuos	Alta	Mínima
Valor de los materiales	Se pierde al final del ciclo	Se mantiene o restaura
Impacto ambiental	Elevado (emisiones, contaminación, agotamiento de recursos)	Reducido mediante estrategias de diseño y recuperación
Innovación	Basada en productividad y reducción de costes	Basada en sostenibilidad, eficiencia y nuevos modelos de negocio

Este cambio de paradigma tiene implicaciones directas en la ingeniería y el diseño de productos. Mientras que en el modelo lineal el diseño se centra en el rendimiento y coste inicial del producto, en el modelo circular se incorpora una visión de largo plazo, considerando aspectos como facilidad de desmontaje, reparabilidad, modularidad, reciclabilidad y durabilidad (Stahel, 2016).

Asimismo, el modelo circular favorece la innovación en modelos de negocio, como el paso de la venta de productos a la oferta de servicios (ej. "producto como servicio"), lo que incentiva a los fabricantes a diseñar productos más duraderos y mantenibles.

Desde el punto de vista ambiental, la economía circular permite una reducción significativa del impacto ambiental de productos y procesos, al disminuir la extracción de recursos, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar la acumulación de residuos. En este contexto, herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) resultan fundamentales para evaluar comparativamente ambos modelos y medir su desempeño en términos cuantitativos.

2.3. BARRERAS A LA VIABILIDAD DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

A lo largo de la redacción de este trabajo se han mencionado, a través de los diversos documentos revisados, las múltiples ventajas de la implementación de la economía circular en la industria. Sin embargo, este modelo presenta una gran dificultad que es, a priori, difícil de superar, puesto que tiene que ver con el reto de romper con el hábito arraigado a los procesos de los fabricantes, de la cadena de suministros y de los consumidores.

De acuerdo con el informe del grupo de trabajo del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, los principales retos a los que se enfrenta la Economía Circular serían: explicar cómo el conocimiento de los flujos de recursos pueden integrarse en el objetivo que se propone, convencer a los decisores políticos de que los límites físicos reales de los recursos naturales empujan a la acción, acelerar el desacoplamiento entre consumo de recursos y la economía de beneficio, desarrollar señales de mercado adecuadas y promover las ciudades como espacios privilegiados para concretar en el proceso de desacoplamiento y demostrar que, gracias a este, puede lograrse la igualdad social.

Por otro lado, la denominada "paradoja de Jevons", descubierta en 1865 por el economista inglés de quien recibe su nombre, William Stanley Jevons, plantea esta economía de una forma no tan sostenible ni viable, dado que encuentra dos errores en su planteamiento.

En primer lugar, el hecho de que todo proceso, incluido el propio proceso de reciclaje, implica un consumo de energía, de forma que en este mismo proceso se generaría implícitamente una pérdida de recursos.

Por otro lado, afirma que a medida que se aumenta la eficiencia con la que se usa un recurso gracias al perfeccionamiento tecnológico, lo más probable es que aumente también el consumo de este recurso, y, por consiguiente, el aumento total del consumo de energía requerida.

Además, algunos de los datos presentados como los de la Comisión Europea sobre predicciones acerca de la economía circular, se alejan notablemente de la realidad actual, haciendo que se valoren como demasiado ambiciosos. Se predice que gracias a la economía circular se va a conseguir una tasa de reciclado del 70%, a día de hoy, lo que se recicla realmente en el mundo no es más del 6% de los materiales extraídos. Esta enorme diferencia hace que la viabilidad de la Economía Circular sea una tesis poco realista.

Del mismo modo, el término decrecimiento, utilizado para fomentar la disminución de gasto de recursos y producción de nuevos bienes, y en consecuencia, del desarrollo de producción de muchas empresas, puede llevar a una percepción del concepto como algo negativo, debido a la connotación implícita que tiene, valorándose como una propuesta que podría generar un gran desempleo, y que a la vez resultaría contradictoria para la evolución de aquellos países actualmente en vías de desarrollo, que no podrían llegar a experimentar ese nivel que a día de hoy persiguen.

Aun así, en contraposición a todo lo anteriormente mencionado en este punto, las voces en defensa de la economía circular estiman que este modelo permitiría obtener beneficios no solo ambientales, sino también sociales y económicos y los justifica ejemplificándolos tal y como se menciona a lo largo de este trabajo fin de grado.

Cabe destacar también que, aunque en la actualidad la economía circular todavía no es alcanzable en su totalidad, todas las diferentes líneas de pensamiento coinciden en la necesidad de modificar el sistema de producción actual, cosa que sitúa de nuevo esta corriente en un enfoque a tener en cuenta para poder conseguir este objetivo.

2.4. TÉCNICAS PARA LA POTENCIACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

Para la realización de este trabajo se han analizado documentos de diversa naturaleza, incluyendo estudios que abordan la viabilidad de la economía circular como alternativa al modelo económico lineal dominante. En este sentido, se han considerado marcos conceptuales ampliamente reconocidos como los propuestos por Kirchherr, Reike y Hekkert (2017), quienes identifican tanto las oportunidades como las barreras para su implementación. Asimismo, se ha revisado la aplicación teórica de la economía circular en pequeñas y medianas empresas, con base en los trabajos de Prieto-Sandoval, Jaca y Ormazabal (2018), quienes destacan el papel de la innovación y la sostenibilidad en el proceso de transición empresarial.

Por otro lado, se han tenido en cuenta enfoques críticos que advierten sobre las limitaciones de la economía circular en la práctica, como los planteados por Corvellec, Stowell y Johansson (2021), quienes analizan las contradicciones inherentes a su discurso institucional. Finalmente, se ha recurrido a fuentes oficiales del Gobierno de España, como boletines y documentos disponibles en la web del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, así como al borrador de la *Estrategia Española de Economía Circular* de 2018, el cual ha servido como base orientativa para articular la propuesta presentada en este trabajo.

Además, se ha analizado también distinta documentación desde la web de la fundación Ellen MacArthur, como por ejemplo “A way to transform our system”, en el cual se hace referencia tanto al modo en qué se consume actualmente como a las distintas técnicas que la industria podría implementar para satisfacer las necesidades del consumidor.

Se podría afirmar que uno de los pilares fundamentales de la economía circular, al que todos los estudios actuales hacen referencia, es la complejidad de cambiar los hábitos de consumo arraigados en los sistemas actuales de la industria tanto de fabricantes, en las cadenas de suministro, como en los usuarios y consumidores finales, dificultando el paso de forma rápida y eficaz hacia un nuevo modelo con patrones y visiones distintos a los que cuenta actualmente, como se apunta en el estudio Nadeem (2019). Para poder establecer un cambio desde un modelo lineal como el actual hasta uno circular, es necesario un periodo de transición en el que se interrelacionen la conceptualización del modelo lineal con uno de ciclos cerrados. Ciertos sectores tardarán más en adaptarse al cambio, y habrá otros que tengan que lidiar con una mezcla de ambos (tanto lineal como circular) durante algún momento de la transición para llevar a cabo este cambio de modelo. Esto implica un reto para su aplicación y adaptación; por ejemplo, el sector de la industria manufacturera, por los hábitos relacionados con la forma de consumo desmedido actual.

En el presente, se están desarrollando nuevas técnicas, sistemas y métodos para potenciar la inclusión de la economía circular al modelo lineal vigente. Dichos métodos implican un cambio en el modelo de consumo. De acuerdo con lo sugerido en algunos estudios, su aplicación teórica debería ser inmediata, pero al llevarlo a la práctica, no es una tarea sencilla por diversos factores (Nadeem et al. 2019; Prieto Sandoval et al. 2021).

En los artículos mencionados anteriormente, se pueden encontrar denominadores comunes sobre la implementación de la Economía Circular, y es que uno de los grandes problemas con los que se enfrenta el modelo lineal es la generación de deshechos y residuos tras la utilización de un producto o servicio, donde se entiende que un planeta con recursos limitados, con una demanda de recursos en aumento, un objetivo de especial interés es la eliminación de los deshechos tras la vida útil del producto o servicio, para obtener el beneficio de todas las partes implicadas, ya sea a nivel consumidor como empresarial para la conservación del planeta.

2.5. AGENDA 2030: ESTADO ACTUAL DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN ESPAÑA

El mundo se consume, se transforma, se agota, con cientos de millones de personas que sufren las consecuencias, que no han llegado aún a los estándares de bienestar de zonas como Occidente. Por eso la Asamblea General de la ONU ha adoptado, por los 193 países miembros de las Naciones Unidas, el 25 de septiembre de 2015 la Agenda para el Desarrollo Sostenible, un plan de acción en favor de las personas, el planeta y la prosperidad, que quiere fortalecer la paz universal y el acceso a la justicia.

Los Estados miembros de las Naciones Unidas aprobaron una resolución en la que reconocen que el mayor desafío del mundo actual es la erradicación de la pobreza y afirman que sin lograrla no puede haber desarrollo sostenible. La agenda plantea 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) interconectados e independientes, que abarcan una amplia gama de desafíos sociales, económicos y ambientales.

Estos 17 ODS son herederos de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), los cuales fueron ocho objetivos de desarrollo internacional que los 192 miembros de las Naciones Unidas acordaron alcanzar para el año 2015. Los objetivos fueron:

1. Erradicar la pobreza extrema y el hambre.
2. Lograr la enseñanza primaria universal.
3. Promover la igualdad entre los sexos y la autonomía de la mujer.
4. Reducir la mortalidad infantil.
5. Mejorar la salud materna.
6. Combatir el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades.
7. Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente.
8. Fomentar una alianza mundial para el desarrollo.

Los ODM fueron un éxito significativo en la reducción de la pobreza y la mejora de la salud y el bienestar en todo el mundo. Entre 1990 y 2015, el número de personas que viven en la pobreza extrema se redujo a la mitad, y el número de niños que mueren antes de los cinco años se redujo en dos tercios. Se lograron avances importantes en la lucha contra el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades. Además, más niños asistieron a la escuela primaria y más mujeres ocuparon puestos de liderazgo.

Si bien se logró un progreso significativo, aún quedó mucho por hacer, es por eso por lo que se procedió a la adopción de la Agenda 2030. En la Figura 3 se recogen los 17 ODS de la agenda 2030:



Producción en colaboración con TROLLBACK + COMPANY | TheGlobalGoals@trollback.com | +1.212.626.1010
Para cualquier duda sobre la utilización, por favor consúltanos en: dpicampa@trollback.com

Figura 3. Objetivos de desarrollo sostenible

La Agenda 2030 se basa en los principios de la universalidad, la responsabilidad compartida y la inclusión. Todos los países, independientemente de su nivel de desarrollo, tienen la responsabilidad de trabajar para alcanzar los ODS. La Agenda también reconoce la importancia de la participación de todos los actores sociales, incluidos los gobiernos, las empresas, la sociedad civil y las personas.

Para lograr los ODS, se requiere una acción concertada y urgente por parte de todos los roles involucrados. Se necesitan inversiones en educación, salud, infraestructuras, energía renovable y otras áreas clave. También es necesario promover la cooperación internacional y la solidaridad.

En el año 2015 también fue aprobado el Foro Político de Alto Nivel sobre Desarrollo Sostenible (FPAN), la plataforma central de las Naciones Unidas para el seguimiento y la revisión de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

El FPAN tiene como mandato:

- Revisar el progreso en la implementación de la Agenda 2030 y los ODS.
- Identificar los desafíos y las oportunidades para la implementación de la Agenda 2030.
- Fortalecer la cooperación política para la implementación de la Agenda 2030.
- Promover la coherencia entre los diferentes actores y procesos involucrados en la implementación de la Agenda 2030.

Los resultados del FPAN se resumen en una declaración ministerial que es adoptada por los Estados Miembros. La declaración ministerial proporciona orientación y recomendaciones para la implementación de la Agenda 2030.

ESTADO ACTUAL DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN ESPAÑA

A nivel europeo, con el objetivo de facilitar esta transición hacia una economía circular, la Comisión Europea adoptó en 2020 el Plan de Acción para la economía circular, donde establece una serie de medidas para promover la transición hacia una economía circular en Europa y de este modo, lograr alcanzar los ODS.

Estas medidas incluyen:

- Establecer objetivos vinculantes para la reducción de residuos: la UE se ha propuesto reducir el 50% de los residuos municipales para 2030 y el 35% de los residuos de envases para 2025.
- Promover el diseño circular de productos: la UE está trabajando para desarrollar requisitos de diseño ecológico para productos que los hagan más duraderos, reparables y reciclables.
- Reforzar la gestión de residuos: la UE está trabajando para mejorar la recogida, clasificación y reciclado de residuos.
- Promover la inversión en la economía circular: la UE está invirtiendo en investigación e innovación para desarrollar nuevas tecnologías y soluciones para la economía circular.

Progreso actual:

- Se ha logrado un cierto progreso en la transición hacia una economía circular en Europa.
- La tasa de circularidad de la UE ha aumentado del 12% en 2010 al 14% en 2020.
- Se han reducido las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción y el consumo de materiales.
- Se han creado nuevos empleos en la economía circular.

Desafíos:

Todavía queda mucho por hacer para lograr una economía circular en Europa. Algunos de los desafíos que se deben abordar incluyen:

- Falta de datos: No hay suficientes datos sobre el estado actual de la economía circular en Europa.
- Falta de inversión: se necesita más inversión en investigación e innovación para desarrollar nuevas tecnologías y soluciones para la economía circular.
- Falta de conciencia: es necesario abordar algunos desafíos clave para lograr una economía circular en Europa.

En junio de 2020, fue aprobada la Estrategia Española de Economía Circular (España Circular 2030), cuyo objetivo es impulsar un nuevo modelo de producción y consumo en España en el que el valor de los productos, materiales y recursos se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible, en el que se reduzcan al mínimo la generación de residuos y se aprovechen con el mayor alcance posible los que no se puedan evitar.

En el marco político y normativo, la presente propuesta se sustenta en la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, que constituye el pilar legislativo principal en materia de gestión de residuos en España. Esta norma sustituye a la anterior Ley 22/2011, adaptando la legislación nacional a los objetivos del Pacto Verde Europeo y estableciendo medidas orientadas a la prevención, reutilización y valorización de residuos, así como a la protección del suelo. Asimismo, la estrategia planteada se alinea con los principios de la Estrategia Europea para la Economía Circular y contribuye directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, promoviendo un modelo productivo más sostenible, eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

En este contexto, la estrategia europea se articula en torno a cinco líneas clave de actuación que orientan el desarrollo normativo y técnico de los Estados miembros (Comisión Europea, 2020):

1. Prevención de residuos: reducir la generación de residuos en origen mediante medidas como el diseño ecológico de productos, la promoción del consumo responsable y la lucha contra el desperdicio alimentario.
2. Reutilización y reparación: alargar la vida útil de los productos mediante su reutilización y reparación, favoreciendo la aparición de nuevos modelos de negocio circulares.
3. Reciclaje: transformar los residuos en nuevos recursos mediante el reciclaje y valorización que permitan su reintegración en los ciclos productivos.
4. Mercado único para el reciclado: establecer un mercado único y competitivo de materiales reciclados en la Unión Europea, mediante estándares comunes de calidad y sistemas de certificación.
5. Investigación e innovación: fomentar el desarrollo de tecnologías y soluciones innovadoras que impulsen la transición hacia una economía circular en sectores clave como la industria, la construcción o el transporte.

Estas líneas estratégicas ofrecen un marco integral para abordar la sostenibilidad desde un enfoque técnico, económico, y ambiental, sirviendo de base para el diseño de soluciones ingenieriles orientadas a la optimización de recursos y la minimización de residuos.

Para implementar la estrategia, se han desarrollado una serie de instrumentos, entre ellos:

- Planes de acción trienales: se definen objetivos específicos y medidas concretas para cada periodo de tres años.
- Indicadores de seguimiento: se monitoriza el progreso en la implementación de la estrategia.
- Financiación: se movilizan recursos financieros públicos y privados para apoyar la transición hacia una economía circular.

Se han logrado algunos resultados positivos desde la implementación de la estrategia, como:

- Reducción de la generación de residuos: La generación de residuos per cápita ha disminuido en un 10% desde 2010.
- Aumento de la tasa de reciclaje: La tasa de reciclaje ha aumentado del 33% en 2010 al 45% en 2023.
- Creación de empleo: Se han creado más de 200.000 empleos en el sector de la economía circular.

Todavía queda mucho por hacer para lograr una economía circular en España. Algunos de los desafíos que se deben abordar incluyen:

- Falta de conciencia: Es necesario aumentar la conciencia sobre la economía circular entre los consumidores y las empresas.
- Falta de inversión: Se necesita más inversión en investigación e innovación para desarrollar nuevas tecnologías y soluciones para la economía circular.
- Falta de infraestructuras: Se necesitan mejorar las infraestructuras para la recogida, clasificación y reciclado de residuos.

La Estrategia Española de Economía Circular es un instrumento importante para promover la transición hacia una economía más sostenible en España. Se han logrado algunos resultados positivos, pero todavía queda mucho por hacer. Es necesario abordar algunos desafíos clave para lograr una economía circular en España.

3. Análisis de ciclo de vida

El aumento de la conciencia sobre la importancia de la protección del medio ambiente y los posibles impactos asociados con los productos, tanto fabricados como consumidos, ha incrementado el interés en el desarrollo de métodos para comprender y abordar mejor estos impactos. Una de las técnicas que se está desarrollando para este propósito es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV o LCA, por sus siglas en inglés *Life Cycle Assessment*).

3.1. DEFINICIÓN, ORIGEN Y EVOLUCIÓN

El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología estandarizada para evaluar de forma objetiva los impactos ambientales potenciales asociados a un producto, proceso o servicio durante todas las etapas de su ciclo de vida; desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, lo que se conoce como análisis “de la cuna a la tumba” (*cradle to grave*) (ISO, 2006a). Dependiendo del objetivo del estudio, también es posible acotar el análisis a otras variantes como “de la cuna a la puerta” (*cradle to gate*), especialmente útil en contextos industriales donde la fase de uso o fin de vida no está bajo control del fabricante. (Hauschild et al., 2018).

Su origen se remonta a las décadas de 1960 y 1970, cuando comenzaron a realizarse estudios preliminares centrados en el consumo energético y la generación de residuos, principalmente en el sector industrial. Un ejemplo notable fue el análisis de envases realizado por Coca-Cola para comparar alternativas en términos de eficiencia energética y gestión de residuos (Hunt et al., 1992).

Durante los años 80, el enfoque evolucionó hacia una metodología más sistemática, incorporando no solo el uso de energía, sino también emisiones, consumo de recursos y otros impactos ambientales. En la década de 1990, organizaciones como SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) impulsaron su estandarización, lo que culminó en la publicación de las normas ISO 14040 Y 14044 (ISO, 2006), que actualmente rigen el procedimiento de ACV.

Desde los años 2000, el ACV ha experimentado una importante expansión gracias al desarrollo de bases de datos especializadas y software como SimaPro, GaBi y OpenLCA. Hoy en día, su aplicación se ha extendido a sectores como la construcción, la agricultura, el transporte y la economía circular, y constituye una herramienta esencial para la toma de decisiones en sostenibilidad y diseño ecológico (Guinée, 2002; Curran, 2012).

El enfoque del ACV es multietapa y multicriterio, permitiendo analizar interacciones complejas entre procesos y evitar el traslado de impactos entre fases del ciclo de vida (Guinée, 2002). Esta capacidad hace del ACV una herramienta clave para el ecodiseño, la

optimización de procesos, la evaluación comparativa de productos (*benchmarking*) y el diseño de políticas ambientales (Hauschild et al., 2018).

3.2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La metodología del ACV está definida y regulada por las normas ISO 14040 e ISO 14044, que estructuran el proceso en cuatro fases principales (ISO, 2006^a; ISO, 2006^b):

1. **Definición del objetivo y alcance:** Se establecen el propósito del estudio, el público destinatario, la unidad funcional, los límites del sistema y las suposiciones metodológicas. Es la fase crítica donde se delimita el contexto y se garantiza la comparabilidad futura de los resultados (ISO, 2006^a).
2. **Análisis del inventario (LCI):** Se recopilan datos cuantitativos sobre todas las entradas y salida (materia, energía, emisiones, residuos) de cada proceso involucrado en el ciclo de vida del producto o sistema. Esta fase puede requerir bases de datos especializadas como Ecoinvent o GaBi (Curran, 2017).
3. **Evaluación del impacto del ciclo de vida (LCIA):** Se transforman los datos del inventario en indicadores de impacto ambiental mediante métodos como ReCiPe, CML o TRACI. Se evalúan categorías como el potencial de calentamiento global, acidificación, eutrofización, agotamiento de recursos o toxicidad humana (Guinée, 2002; Hauschild et al., 2018).
4. **Interpretación de resultados:** Se analizan los resultados, se identifican los procesos más impactantes y se extraen conclusiones coherentes con los objetivos definidos inicialmente. Esta fase también incluye análisis de incertidumbre y sensibilidad (ISO, 2006^b).

Como se acaba de comentar, la fase de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (LCIA, *Life Cycle Impact Assessment*) constituye el tercer bloque metodológico del ACV, según lo definido por las normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006^a; ISO, 2006^b). De las cuatro etapas de un ACV se puede decir que es la más desarrollada desde un punto de vista metodológico.

Su función es traducir los datos cuantitativos obtenidos en el análisis de inventario (LCI) en indicadores ambientales significativos que reflejen los posibles efectos de los flujos de entrada y salida sobre el medio ambiente y la salud humana.

El objetivo principal de esta etapa es proporcionar una base científica sólida y estructurada para la interpretación de los resultados del ACV, ayudando a identificar las categorías de impacto más relevantes, los procesos más intensivos ambientalmente, y las oportunidades de mejora (Hauschild et al., 2018).

3.2.1. ETAPAS EN LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA

Según la ISO 14044 (2006), la LCIA se compone de las siguientes etapas:

1. Selección de categorías de impacto, indicadores y modelos de caracterización: Se definen las categorías ambientales a considerar (por ejemplo, cambio climático, acidificación, eutrofización), los indicadores asociados (como kg CO₂-eq para cambio climático) y los modelos científicos que establecen las relaciones causa-efecto entre los flujos del inventario y dichos impactos (ISO, 2006b).
2. Clasificación: Los flujos de inventario se asignan a las categorías de impacto pertinentes. Por ejemplo, el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂) se clasifican como contribuyentes al potencial de calentamiento global.
3. Caracterización: Se cuantifica la contribución relativa a cada flujo a la categoría de impacto mediante factores de caracterización. Por ejemplo, el metano tiene un potencial de calentamiento global 28 veces superior al CO₂ en un horizonte temporal de 100 años (IPCC, 2021). Esta fase proporciona resultados medidos en unidades comunes por categoría, facilitando la comparación y el análisis.
4. Normalización: Se trata de una fase opcional, en la cual los resultados se expresan en relación con una referencia (por ejemplo, per cápita anual en una región específica), permitiendo una mejor interpretación de su magnitud relativa (Hauschild et al., 2018).
5. Ponderación: Se trata, al igual que en el caso anterior de una fase opcional. En ella, se aplican valores de importancia relativa a cada categoría, de acuerdo con criterios sociales, económicos o políticos. Esta fase, por su alto grado de subjetividad, no está permitida en estudios destinados a uso comparativo público, según ISO 14044 (ISO, 2006b).

3.2.2. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA

Existen múltiples metodologías de evaluación de impacto desarrolladas por distintas instituciones científicas, cada una con modelos de caracterización, alcances geográficos y categorías de impacto propios. La elección del método debe basarse en el contexto geográfico, el objetivo del estudio, la precisión deseada y la disponibilidad de datos (Jolliet et al., 2015; Curran, 2017). A continuación, se describen brevemente los métodos más utilizados:

- **CML-IA (Centro de Estudios Medioambientales de Leiden)**
Desarrollado por la Universidad de Leiden, es uno de los métodos más consolidados en Europa. Se basa en una caracterización a nivel de impactos intermedios (midpoints), como cambio climático, acidificación, eutrofización o agotamiento de recursos abióticos. (Guinée et al., 2002). Es muy utilizado en estudios comparativos debido a su transparencia y estabilidad metodológica.

- **ReCiPe**

Es una de las metodologías más completas y actualizadas. Integra los enfoques de impactos intermedios (*midpoints*) y finales (*endpoints*), permitiendo evaluar tanto categorías específicas como el daño sobre áreas de protección como salud humana, ecosistemas y recursos naturales (Goedkoop et al., 2013). Además, permite seleccionar diferentes perspectivas temporales y éticas (individualista, jerárquica, igualitaria), lo que amplía su aplicabilidad.
- **TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts)**

Desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), está adaptado al contexto norteamericano. Evalúa impactos como el cambio climático, formación de ozono troposférico, toxicidad humana y ecotoxicidad acuática (Bare, 2011). Es preferido para estudios realizados en EE. UU. o dirigidos al cumplimiento normativo en ese país.
- **ILCD (International Life Cycle Data System)**

Desarrollado por el Joint Research Centre de la Comisión Europea, ILCD propone una metodología de referencia para estudios dentro del ámbito europeo, especialmente en marcos como Product Environmental Footprint (PEF) (European Commission, 2010). Ofrece una buena relación entre robustez científica y aplicabilidad práctica.
- **EF (Environmental Footprint)**

Promovido por la Comisión Europea, se basa en la ILCD y se utiliza en el contexto de la huella ambiental de productos (Product Environmental Footprint, PEF) y organizaciones (Organisation Environmental Footprint, OEF). Está siendo progresivamente adoptado en políticas públicas y etiquetado ambiental europeo (European Commission, 2021).

La elección del método de evaluación de impacto puede influir significativamente en los resultados del ACV. Por ejemplo, un mismo flujo de emisión puede tener factores de caracterización diferentes según el método empleado. Esto puede generar variabilidad y limitaciones en la comparabilidad de estudios si no se utiliza una metodología coherente.

Además, no todos los métodos cubren todas las categorías. Algunos, como ReCiPe, son más completos, mientras que otros priorizan determinadas categorías en función del contexto regional (Curran, 2017). Es esencial, por tanto, justificar claramente la elección del método en función de los objetivos del estudio y su coherencia con los datos disponibles (Hauschild et al., 2018).

En cualquier caso, los métodos LCIA deben ser considerados como modelos de representación simplificada del mundo real, con sus correspondientes niveles de incertidumbre, por lo que su uso debe ir acompañado de análisis crítico y, cuando sea posible, de evaluaciones de sensibilidad e incertidumbre.

3.3. PRINCIPALES HERRAMIENTAS PARA LA REALIZACIÓN DE UN ACV

La aplicación práctica del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) requiere el uso de herramientas informáticas que permitan modelar sistemas complejos, gestionar grandes volúmenes de datos y aplicar metodologías estandarizadas de evaluación. Estas herramientas, comúnmente conocidas como software LCA, son fundamentales para garantizar la consistencia metodológica, la reproducibilidad y la calidad de los resultados obtenidos (ISO, 2006a; ISO,2006b).

El desarrollo de estas herramientas responde a la necesidad de integrar de forma efectiva las fases del ACV, desde la recopilación del inventario hasta la interpretación de resultados, así como facilitar la toma de decisiones en contextos de diseño, mejora de procesos o comunicación ambiental. A continuación, se presentan las principales plataformas utilizadas en la práctica profesional y académica.

- SimaPro, desarrollado por Pré Sustainability, es uno de los programas más consolidados en el ámbito del ACV. Destinado a usuarios avanzados, permite realizar análisis detallados a través de una interfaz estructurada por procesos, con capacidad para modelado modular, evaluación de escenarios y análisis de sensibilidad (PRé Sustainability, 2023). Integra metodologías como ReCiPe, CML, IMPACT 2002+ e ILCD, y es compatible con bases de datos como Ecoinvent, Agri-footprint y ELCD (Guinée et al., 2011).
- GaBi, desarrollado por Sphera, es ampliamente utilizado en la industria gracias a su enfoque orientado a sectores específicos como automoción, construcción o electrónica. Ofrece modelos preconfigurados, integración con bases propias (GaBi DB) y externas (Ecoinvent, ELCD), y soporte a estándares como EN 15804 o PEF (Sphera, 2024). Su interfaz gráfica facilita el análisis paramétrico y el modelado de escenarios complejos (Curran, 2017).
- OpenLCA, desarrollado por GreenDelta, es una herramienta de código abierto que ha ganado popularidad en entornos académicos y de investigación. Aunque gratuita, permite realizar estudios avanzados de ACV, ACV social y huella de carbono. Es compatible con múltiples bases de datos (Ecoinvent, Social Hotspot DB, Agribalyse) y metodologías como ReCiPe, ILCD, EF y TRACI (GreenDelta, 2023; Wernet et al., 2016). Además, cuenta con extensiones para automatización y conectividad con Python mediante Brightway2 (Mutel, 2017).

- Umberto LCA+, de ifu Hamburg, destaca por su interfaz gráfica basada en diagramas de flujo Sankey, lo que facilita el análisis visual de flujos de materia y energía. Esta herramienta es especialmente adecuada para estudios de eficiencia energética, economía circular y huella ambiental en procesos industriales (ifu Hamburg, 2024). Integra bases como Ecoinvent y GaBi, y permite modelado dinámico y análisis en tiempo real.
- LCA calculator, es una herramienta digital de libre acceso orientada a la realización simplificada de análisis de ciclo de vida, desarrollada con fines educativos y formativos. Su enfoque accesible y su diseño intuitivo lo convierten en una opción especialmente adecuada para introducirse en la práctica del ACV, así como para realizar estudios exploratorios o comparativos con un nivel básico o intermedio de complejidad (Lo-Iacono-Ferreira et al., 2016).

La plataforma permite al usuario construir modelos sencillos mediante la definición de entradas y salidas asociadas a un sistema producto, configurar etapas del ciclo de vida (producción, uso, fin de vida, etc.), y aplicar metodologías reconocidas como CML o ReCiPe para evaluar los impactos ambientales. Los resultados se presentan de forma gráfica y numérica, y permiten visualizar el aporte de cada etapa a las categorías de impacto seleccionadas (Curran, 2017)

Entre sus principales ventajas se encuentran:

- Accesibilidad total (no requiere licencia).
- Curva de aprendizaje reducida.
- Entorno web educativo y didáctico.
- Posibilidad de aplicar diferentes métodos de evaluación.
- Enfoque adecuado para la enseñanza del ACV en ingeniería y ciencias ambientales.

LCA Calculator, desarrollado por Sphera, es una herramienta simplificada que permite calcular resultados de análisis de ciclo de vida a partir de modelos previamente definidos en Sphera LCA for Experts (anteriormente Gabi). Aunque presenta una interfaz accesible y está orientada a facilitar una interpretación de resultados, puede utilizarse en estudios completos y rigurosos, incluyendo aquellos con fines normativos, certificaciones ambientales o aplicaciones industriales.

Dado el carácter formativo de este Trabajo Fin de Grado y el objetivo de aplicar los principios del ACV a un caso de estudio concreto, se ha seleccionado LCA Calculator como la herramienta principal de modelado y evaluación. Esta elección se justifica tanto por su idoneidad metodológica en el contexto académico, como por su coherencia con el alcance del presente trabajo. En los capítulos posteriores se abordará con mayor detalle su estructura, funcionalidades, limitaciones y aplicación al sistema producto objeto de análisis.

Existen otras herramientas específicas como One Click LCA (especializada en el sector de la construcción), Ecochain (focalizada en la trazabilidad ambiental en cadenas de suministro), o Sustainabill. Además, para usuarios avanzados, el uso de lenguajes como Python permite crear modelos altamente personalizables para análisis masivos, estudios prospectivos o integración con sistemas de gestión de datos (Mutel, 2017).

La selección de una herramienta de ACV debe considerar factores como:

- El tipo de estudio (académico, normativo, exploratorio, empresarial).
- La disponibilidad y compatibilidad de bases de datos.
- La metodología de evaluación de impacto deseada.
- Requisitos de licencia, soporte y coste.
- Capacidad para modelar procesos complejos o colaborativos.

No existe una herramienta “óptima” universal, sino que su idoneidad depende del contexto de aplicación, el perfil del usuario y los objetivos del análisis.

3.4. IMPLEMENTACIÓN DEL ACV EN EL SECTOR DE LA EDIFICACIÓN

El sector de la edificación constituye una de las áreas de mayor relevancia en términos de sostenibilidad, debido a su elevado consumo de recursos, energía y generación de residuos a lo largo del ciclo de vida los edificios. Según el *Global Status Report for Buildings and Construction* (UNEP, 2020), este sector fue responsable de aproximadamente el 36% del consumo energético mundial y del 37% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía en 2019.

Ante este escenario, la adopción de metodologías de evaluación ambiental como en Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ha adquirido una importancia creciente. El ACV permite cuantificar de forma sistemática los impactos ambientales asociados a todas las etapas del ciclo de vida de un edificio o de sus componentes, desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida útil, incluyendo la fabricación, uso y mantenimiento (ISO 14040, 2006). Esta visión integral resulta especialmente útil en la fase de diseño y toma de decisiones, ya que permite identificar oportunidades de mejora, optimizar materiales y sistemas constructivos, y reducir la huella ambiental global del edificio (Ortiz et al., 2009).

En particular, uno de los subsistemas clave en la edificación que requiere atención específica es el de los ascensores, debido a su naturaleza electro-mecánica, su larga vida útil (20-30 años) y su uso intensivo en edificios residenciales, comerciales e institucionales (IEA, 2013). El consumo energético durante la fase de uso representa una parte significativa de su impacto global, aunque también deben considerarse las emisiones asociadas a la fabricación de componentes como motores, cabinas, sistemas de tracción, contrapesos y guías (Sheng et al., 2020).

Distintos estudios de ACV centrados en ascensores han demostrado que:

- La fase de uso (consumo eléctrico) es generalmente la más intensiva en impactos, especialmente en regiones con matrices energéticas basadas en combustibles fósiles (Ardente et al., 2005).
- La fase de fabricación también tiene una contribución relevante, principalmente por el uso de acero, aluminio y componentes electrónicos.
- Las estrategias de mantenimiento eficiente, modernización de sistemas de control y uso de máquinas de tracción sin engranajes pueden reducir significativamente los impactos totales (González-Bautista et al., 2022).

En este sentido, integrar el ACV en la evaluación ambiental de ascensores permite no solo cuantificar su desempeño ambiental, sino también comparar tecnologías (hidráulicos vs. eléctricos, con o sin sala de máquinas), analizar la viabilidad de su reutilización o reciclaje, y orientar el diseño hacia soluciones más sostenibles.

Además, existen iniciativas normativas que fomentan esta integración. La norma EN 15978:2011, aplicable al análisis ambiental de edificios, promueve la descomposición del ciclo de vida en módulos (producción, construcción, uso, fin de vida), lo que permite aislar y estudiar el impacto de sistemas específicos como los ascensores. Por otro lado, algunas declaraciones ambientales de producto (EPD) ya están disponibles para elevadores comerciales, lo que facilita su integración en evaluaciones multicriterio (The International EPD System, 2023).

De acuerdo con las Reglas de Categoría de Producto (PCR), el ciclo de vida evaluado se divide en cinco etapas diferentes del ciclo de vida, cada una de las cuales consta de módulos de información adicionales (ver Tabla 2). Siguiendo este enfoque, se determinan todos los procesos considerados en la evaluación del ciclo de vida (entradas salidas y resultados de la evaluación de impactos). El desempeño ambiental asociado a cada módulo de información se informa por separado, tal como exige la norma UNE EN 15978:2011.

Tabla 2. Etapas del ciclo de vida consideradas para edificios, según la norma UNE-EN 15978:2011

Información para la evaluación del edificio				Información suplementaria	
A1-A3			A4-A5		B1-B7
Etapa del producto			Proceso de construcción		
A1	A2	A3	A4	A5	Etapa de uso
Suministro de materias primas y producción de productos de construcción	Transporte	Manufactura	Transporte	Proceso de construcción	
					B1
					B2
					B3
					B4
					B5
					B6
					B7
					Uso
					Mantenimiento
					Reparación
					Reemplazo
					Renovación
					Uso de energía operativa
					Uso de agua operativa
C1-C4				D	
Fin de vida útil				Beneficios y cargas fuera del límite del sistema	
C1	C2	C3	C4		
Deconstrucción/demolición	Transporte	Procesamiento de residuos	Eliminación	Reutilización	
				Recuperación	
				Reciclaje	
				Potencial	



Figura 4. Etapas ciclo de vida del ascensor

A continuación, se presenta una descripción detallada de estas cinco etapas, referidas al caso concreto del estudio realizado: un ascensor, conforme a lo establecido por las Reglas de Categoría de Producto (PCR).

Etapa de producto (A1-A3)

La etapa de producto comprende todos los procesos relacionados con la extracción y producción de materias primas utilizadas en la fabricación del ascensor [A1], así como las actividades de manufactura llevadas a cabo por TKE y sus proveedores de primer nivel.

[A1]-Suministro de materias primas: Esta subetapa abarca la extracción de recursos naturales y su procesamiento hasta obtener materiales básicos. Para el ascensor evaluado, la mayoría de estos procesos se desarrollan en América Latina. Se recogen datos detallados sobre el peso y el tipo de materiales que componen el ascensor, teniendo en cuenta también el uso promedio de materiales reciclados (chatarra) en los distintos metales.

[A2]-Transporte a la planta de fabricación: Se analiza el impacto del transporte considerando el peso total entregado por todos los proveedores de materias primas y subcomponentes. Se calcularon distancias promedio con base en escenarios de suministro específicos por país.

[A3]-Fabricación: Esta fase incluye todos los procesos de transformación necesarios para obtener componentes con funciones y calidades específicas, a partir de las materias primas. Comprende también las operaciones de ensamblaje de subunidades y componentes proporcionados por proveedores directos.

En la fabricación subcontratada se ha tenido en cuenta el consumo de energía y otros datos relevantes de todos los proveedores directos.

Además de la fabricación interna de ciertos componentes estructurales, en la planta también se lleva a cabo el ensamblaje de otros elementos del ascensor a partir de piezas y materiales suministrados externamente

Etapa de construcción (A4-A5)

Esta etapa contempla las actividades relacionadas con el transporte desde la planta de TKE hasta el lugar de instalación, así como el montaje del ascensor en el edificio.

[A4]-Transporte al sitio de instalación: se consideran los medios de transporte por carretera y mar. La distancia media se ha calculado en función de la distribución de ventas por países.

[A5]-Instalación: Este módulo incluye todos los insumos y emisiones asociados al montaje del ascensor en el edificio, así como el tratamiento de los residuos generados por el material de embalaje utilizado durante el transporte.

Etapa de uso (B1-B7)

Esta etapa incluye las actividades necesarias para el funcionamiento, mantenimiento y consumo energético del ascensor durante toda su vida útil.

[B1]-Uso: Se refiere al impacto ambiental generado por el uso directo del producto. En el caso de los ascensores, este módulo no es aplicable, ya que no existe una interacción directa entre el usuario y el producto que genere cargas ambientales adicionales.

[B2] – Mantenimiento preventivo: El mantenimiento del ascensor se puede clasificar en preventivo y correctivo. En este módulo se consideran solo las actividades de mantenimiento preventivo, que son programadas regularmente para asegurar el buen funcionamiento del ascensor durante su vida útil de referencia. El mantenimiento correctivo, que depende del uso específico y es difícil de predecir, no se incluye en esta evaluación.

Los principales insumos de este módulo son:

- Consumo de electricidad.
- Producción y transporte de repuestos y materiales auxiliares.
- Desplazamientos del personal técnico para realizar tareas de mantenimiento preventivo.

[B3]-Reparación: Engloba las acciones necesarias para restaurar el producto tras una avería. En el caso de los ascensores, este módulo se excluye, ya que las reparaciones dependen fuertemente del comportamiento del usuario y son difíciles de estimar.

[B4]-Reemplazo: Considera el impacto ambiental del reemplazo de partes o componentes del producto. Para este estudio, se ha fusionado con el módulo B5 según lo estipulado en el C-PCR-008.

[B5]-Reacondicionamiento: Se refiere a la renovación del producto para extender su vida útil más allá de su duración prevista. No se considera en este caso, ya que no se contempla una extensión del periodo de uso

[B6] – Consumo energético en operación: Este módulo contempla el consumo de energía esperado durante los 25 años de vida útil del ascensor, calculado según la categoría de uso 2, conforme a la norma ISO 25745-2.

[B7] – Consumo de agua en operación: Aplica cuando el producto requiere agua durante su uso. En el caso de los ascensores, este módulo no es relevante y por tanto se excluye.

Etapas de fin de vida (C1-C2)

Esta etapa incluye todos los procesos relacionados con la retirada definitiva del ascensor al final de su vida útil.

[C1] – Desmontaje: Abarca todas las entradas y salidas asociadas al desmontaje del ascensor en el edificio, así como la separación inicial de materiales. Esta clasificación permite que los materiales destinados al reciclaje estén listos para ser enviados a las instalaciones correspondientes.

[C2] – Transporte: Este módulo considera el transporte por carretera de los componentes desmontados hasta las plantas de tratamiento de residuos.

[C3] – Tratamiento de residuos: Este módulo incluye la recolección y procesamiento de los materiales provenientes del desmontaje del ascensor, que están destinados a la reutilización, reciclaje o recuperación energética.

[C4] – Eliminación final: Considera la fracción de materiales del ascensor que no puede ser reutilizada, reciclada ni valorizada energéticamente, y que por tanto se destina a vertedero o incineración sin recuperación.

Beneficios y cargas más allá de los límites del sistema (D)

[D]-Reutilización, recuperación y reciclaje potencial: Este módulo refleja los beneficios netos obtenidos por el reciclaje de metales al final de la vida útil del ascensor. Se incluyen los créditos ambientales por los materiales reciclados que sustituyen materias primas vírgenes en otros sistemas.

Por tanto, el ACV se presenta como una herramienta robusta y adecuada para abordar el análisis ambiental de ascensores en el contexto del diseño sostenible de edificios. Esta aproximación será adoptada en el presente trabajo, donde se seleccionará un modelo representativo de ascensor para ser evaluado mediante la herramienta LCA Calculator, profundizando en sus impactos ambientales a lo largo de todo su ciclo de vida.

3.5. DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTO

Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP), conocidas internacionalmente como *Environmental Product Declarations* (EPD), son instrumentos normalizados de comunicación ambiental que permiten presentar información cuantificada, verificable y comparable sobre el comportamiento ambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida, de acuerdo con los principios de las etiquetas tipo III definidos en la norma ISO 14025.

La elaboración de una EPD requiere la realización de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a los requisitos metodológicos establecidos en la norma ISO 14044 (2006), siguiendo además un conjunto específico de Reglas de Categoría de Producto (RCP), que aseguran la coherencia y comparabilidad entre productos funcionalmente equivalentes (ISO, 2017).

Las EPD no expresan un juicio ambiental sobre el producto, sino que exponen de forma objetiva indicadores clave como el potencial de calentamiento global (GWP), el agotamiento de recursos naturales, la eutrofización o la acidificación del suelo y del agua (Del Borghi, 2013). Esta información resulta especialmente valiosa en sectores como la construcción o la fabricación industrial, donde se integran en sistemas de certificación ambiental (LEED, BREEAM, VERDE) y se promueven desde políticas de contratación pública verde (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITERD], 2020).

Asimismo, para garantizar su credibilidad, las EPD deben ser verificadas por un tercero independiente y publicadas en registros reconocidos a nivel internacional, como el International EPD System o el programa GlobalEPD de AENOR. Estas declaraciones no solo fomentan la transparencia ambiental y la mejora continua, sino que también se consolidan como herramientas estratégicas en el diseño sostenible y la toma de decisiones basada en datos dentro del marco de la economía circular (Zhao, You, & Xu, 2019).

A nivel técnico, la EPD presenta solo los resultados exigidos por la RCP correspondiente, usualmente expresados por unidad funcional o declarada (por ejemplo, kg de CO₂-eq por metro cuadrado de producto). Por tanto, una EPD no reemplaza a un ACV completo, sino que es su producto comunicativo parcial y regulado (ISO 2006c; Hauschild et al., 2018).

En la siguiente tabla se sintetizan las principales diferencias entre ambas herramientas:

Tabla 3. Diferencias entre ACV y EPD

Característica	ACV (LCA)	EPD
Normativa	ISO 14040, ISO 14044	ISO 14025, UNE-EN 15804
Propósito	Evaluación ambiental técnica	Comunicación estandarizada de impactos ambientales
Público destinatario	Ingenieros, técnicos, responsables de sostenibilidad	Cliente, prescriptores, organismos de contratación
Verificación por terceros	Opcional	Obligatoria
Base de datos y metodología	Libre, según objetivo del estudio	PCR específica por tipo de producto
Contenido	Completo (todos los flujos y categorías)	Parcial (según lo que establezca la PCR)
Comparabilidad entre productos	Limitada	Permitida entre producto bajo misma PCR y condiciones

Por tanto, se puede concluir que el ACV y la EPD son herramientas complementarias. Mientras el primero proporciona una base metodológica robusta para entender los impactos ambientales, la segunda permite comunicarlos de forma creíble y normalizada, cumpliendo con los requisitos del mercado, la administración pública o los sistemas de certificación ambiental de productos y edificios (AENOR, 2019; Curran, 2017).

4. Caso práctico: Aplicación del ACV al proceso de fabricación/modernización de un ascensor

4.1. CASO DE ESTUDIO

El ascensor objeto del estudio es el modelo EOX, la nueva plataforma de ascensores de TK Elevator que integra, desde su concepción, tres pilares fundamentales:

1. Eficiencia energética

- Hasta un 28% menos de consumo respecto a modelos anteriores, gracias a la iluminación LED en hueco y cabina, al accionamiento regenerativo, y los modos de espera y suspensión.
- Clasificación Clase A (ISO 25745-2) de eficiencia energética.
- Transparencia continua: el panel de control en el portal del cliente muestra consumo y ahorros diarios, mensuales y anuales.
- Producción y servicio con electricidad 100% renovable y mantenimiento digital, reduciendo la huella de carbono global.

2. Enfoque centrado en el cliente

- Experiencia fluida: los pasajeros pueden llamar a la cabina mediante su smartphone y disfrutar de contenidos dinámicos en la pantalla multimedia integrada.
- Mayor disponibilidad operativa gracias al mantenimiento predictivo basado en datos.
- Diseño pensado para satisfacer tanto a proyectistas y constructores como a gestores y usuarios finales de edificios residenciales y de baja altura.

3. Transformación digital nativa

- Infraestructura en la nube de Microsoft y computación acelerada NVIDIA incluida de fábrica, eliminando visitas adicionales para futuras ampliaciones.

Todos los componentes para servicios digitales (IoT, análisis de datos, actualizaciones OTA) vienen instalados desde el primer día, garantizando escalabilidad.

El ascensor EOX es una solución eléctrica sin cuarto de máquinas orientada al sector residencial europeo. Este equipo ha sido diseñado para satisfacer las exigencias de eficiencia energética, digitalización y sostenibilidad constructiva, integrando de fábrica funcionalidades IoT y un sistema de mantenimiento predictivo basado en datos.

Los principales componentes del ascensor se agrupan en cinco subsistemas funcionales: sistema de tracción, cabina, puertas, sistema de control y elementos estructurales. A continuación, se describen brevemente cada uno de ellos desde el punto de vista técnico, funcional y material.

El **sistema de tracción** constituye el núcleo mecánico del ascensor. Está compuesto por una máquina sin engranajes (*gearless*) de imanes permanentes montada directamente en el hueco, que, proporcionada un alto rendimiento energético, bajo nivel sonoro y mejor mantenimiento en comparación con máquinas convencionales. Incluye el conjunto de poleas, cintas planas de tracción (en lugar de cables de acero), guías verticales para cabina y contrapeso, y el sistema de equilibrado. Las guías están fabricadas en acero laminado de alta resistencia, y los componentes móviles están diseñados para una larga durabilidad, superior a los 1.5 millones de ciclos. Este conjunto representa aproximadamente el 30% de la masa total del equipo (EPD, 2023).

La **cabina** es el módulo destinado al transporte de personas. Está construida con un bastidor de acero galvanizado, paneles interiores de acero pintado o melamina, suelo técnico vinílico o similar, y techo con luminarias LED de bajo consumo. Incorpora sistemas de guiado, paracaídas, zapatas, pasamanos de acero, displays TFT, y botoneras interiores con pulsadores iluminados. La estructura de la cabina está diseñada para cumplir los requisitos de accesibilidad y confort acústico según EN 81-70 (European Committee for Standardization, 2021). Su diseño modular permite distintas configuraciones estéticas con materiales reciclables.

El sistema de **puertas automáticas**, tanto en cabina como en planta, está compuesto por hojas metálicas (acero inoxidable o pintado), mecanismos de apertura motorizados, sensores de seguridad tipo cortina de infrarrojos y perfiles de aluminio. Las puertas pueden tener apertura central o lateral y están diseñadas para resistir más de un millón de ciclos sin necesidad de sustitución. Los motores son de tipo brushless (y están gestionados por un controlador electrónico específico que adapta la velocidad y el par de cierre según condiciones reales).

El **sistema de control** incluye el controlador lógico (PLC), el inversor de frecuencia (VVVF), la unidad de potencia, las botoneras de planta (LOP), el sistema de comunicación bidireccional (VoIP), y el módulo IoT de conectividad remota, que permite el mantenimiento predictivo mediante la plataforma MAX. Este controlador puede integrarse en el marco superior de la puerta de cabina (*controller-in-door*), eliminando así la necesidad de una sala de máquinas. Dispone de funcionalidades de eficiencia energética, autodiagnóstico, actualizaciones OTA (over-the-air) y protocolos de ciberseguridad certificados conforme a IEC 62443 e ISO 8102-20.

Por último, los **elementos estructurales** comprenden la estructura portante del ascensor, el contrapeso con masas calibradas, los amortiguadores hidráulicos de seguridad, fijaciones al edificio, bastidor base, cableado eléctrico, sensores, limitador de velocidad y sistemas de protección. Están fabricados en acero estructural con tratamientos anticorrosión y componentes plásticos técnicos (como PA66, ABS, o polietileno de alta densidad) para aislamiento y fijación. También se incluyen los cables libres de halógenos (LSZH) y los sensores de agua para protección del foso.

La figura 3 muestra una composición detallada del ascensor de referencia y su embalaje en términos cuantitativos, de acuerdo con los Reglas de Categoría de Producto (RPC).

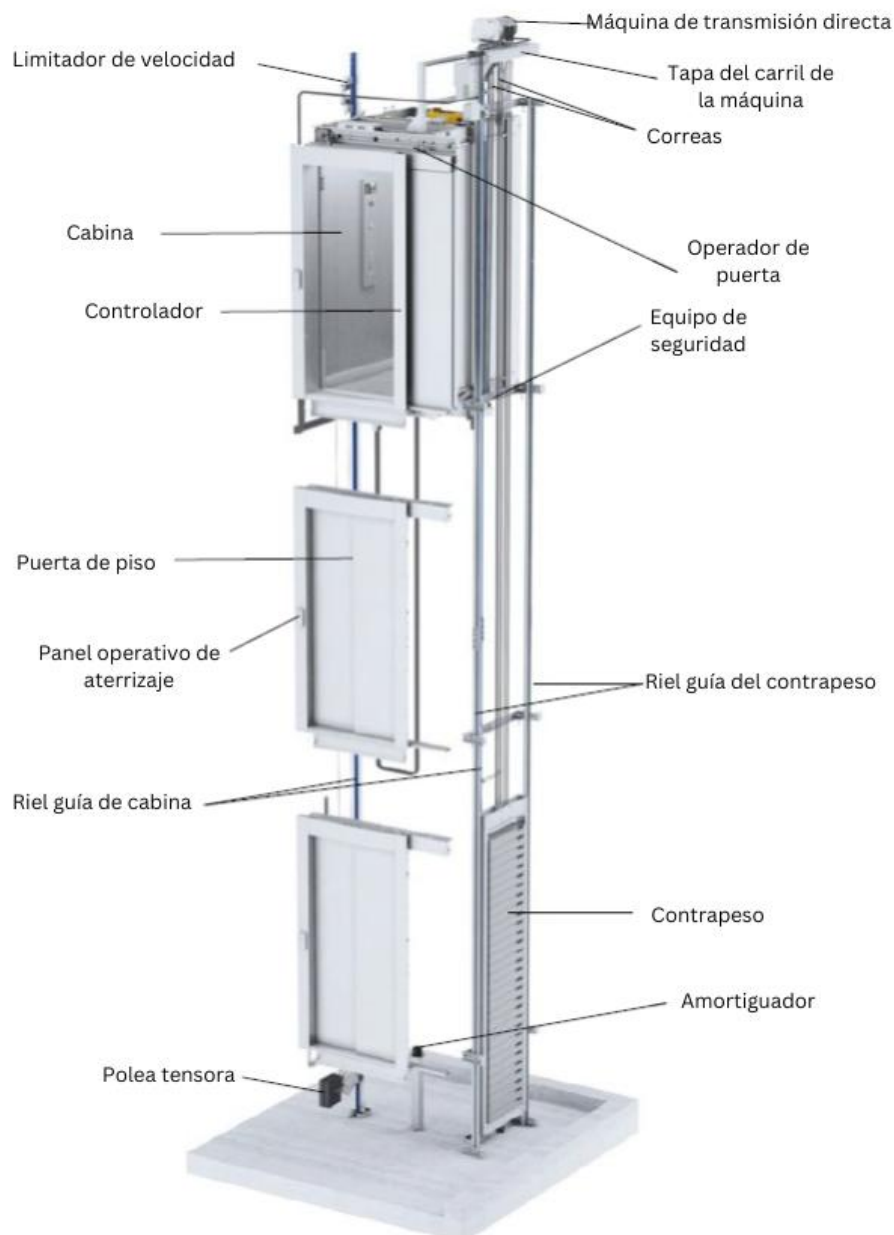


Figura 5. Partes ascensor EOX

En términos funcionales, la unidad analizada tiene una capacidad de carga nominal de 630 kg, una velocidad nominal de 1 m/s, y está configurada para un recorrido de cinco paradas con una altura total de 12,25 metros. El uso previsto corresponde a edificios residenciales de baja altura, con operación durante 365 días al año, bajo la categoría de uso 2 según la norma ISO 25745-2.

Tabla 4. Especificaciones del ascensor evaluado según los Requisitos Particulares Complementarios. En la columna central se encuentran los valores medios utilizados

Índice	Valores representativos para la unidad de referencia	Rango de aplicación del modelo de ascensor
Tipo de instalación	Nueva instalación	
Nombre comercial	EOX	
Uso principal	Transporte de pasajeros	
Tipo de ascensor	Eléctrico, sin cuarto de máquinas	
Tipo de sistema de tracción	Accionamiento por tracción si engranajes	
Carga nominal [Q]	630 kg	450 hasta 1600 kg
Velocidad nominal	1 m/s	1 m/s hasta 1.75 m/s
Número de paradas	5	Hasta 20
Altura alcanzada	12.25 m	Hasta 75
Número de días operativo por año	365	
Categoría de uso aplicada según la norma ISO 25745-2	1,2&3	
Vida útil de referencia	25 años	
Área geográfica de instalación	Europa	
Equipamiento opcional	Ninguno	

4.2. ESCENARIOS ESTUDIADOS

Se han definido dos escenarios técnicos diferenciados:

- Escenario 1 (Escenario de referencia): Ascensor completamente nuevo, donde todos los componentes son de fabricación reciente, cuyos componentes han sido fabricados íntegramente a partir de materias primas vírgenes mediante procesos tradicionales de economía lineal.
- Escenario 2 (Ascensor reacondicionado): Ascensor con reutilización parcial, que incorpora ciertos componentes previamente usados (guías, amortiguadores, contrapeso y puertas de pasillo). Los componentes reutilizados han sido seleccionados debido a su alta durabilidad, su escaso nivel de obsolescencia tecnológica y la posibilidad de ser desmontados e integrados nuevamente sin comprometer la seguridad ni el rendimiento del sistema. Estas piezas provienen de otro ascensor del mismo modelo y marca el cuál ha sido inhabilitado El resto de los

elementos, incluidos los de mayor sensibilidad tecnológica o propensos al desgaste, serán sustituidos por piezas nuevas, con el fin de cumplir los requisitos técnicos, funcionales y normativos del sistema. Este escenario será llamado “Ascensor reacondicionado”.

Las especificaciones técnicas del ascensor y su configuración estándar permiten garantizar que la funcionalidad sea equivalente en ambos escenarios evaluados (nuevo vs. reacondicionado). Esto resulta crucial para que las diferencias de impacto ambiental puedan ser atribuibles únicamente a la naturaleza y origen de los materiales empleados, y no a diferencias funcionales entre las alternativas.

4.3. METODOLOGÍA DE ACV APLICADA AL CASO DE ESTUDIO

El análisis del ciclo de vida, como se ha mencionado anteriormente, es una herramienta que sirve para estudiar los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, en nuestro caso un ascensor. Se procederá a comparar el impacto ambiental de usar piezas nuevas en la instalación de un ascensor frente a la utilización de piezas provenientes de economía circular. Mediante la reutilización de piezas se busca alargar la vida útil tanto de las piezas citadas como del producto en general. Esto implica tanto el fomento de la compra de productos de segunda mano como la reparación de piezas dañadas.

La comparación de estos dos escenarios se realizará conforme a las normas ISO 14040 y 14044.

4.3.1. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO

Este estudio tiene como finalidad establecer un marco de comparación ambiental entre dos soluciones técnicas viables para la instalación de un sistema de elevación en un entorno edificado preexistente. Se persigue evaluar, desde una perspectiva cuantitativa, las diferencias en el comportamiento ambiental de un ascensor nuevo completo frente a una alternativa basada en la reutilización parcial de componentes estructurales y mecánicos. El análisis considera como hipótesis principal que la recuperación de elementos funcionales previamente utilizados puede suponer una mejora ambiental significativa frente a la fabricación e instalación de componentes nuevos.

Más allá del contraste de impactos, el estudio pretende ofrecer una base técnica objetiva para la integración de estrategias de reutilización en productos electromecánicos complejos, considerando no solo los beneficios directos en términos de reducción de emisiones, consumo de materias primas y generación de residuos, sino también las implicaciones para el ciclo de vida completo del sistema. El objetivo es, por tanto, doble:

por un lado, verificar la viabilidad ambiental de la opción circular, y por otro, identificar en qué fases y categorías de impacto dicha alternativa puede ofrecer ventajas relevantes.

Esta evaluación servirá como herramienta de apoyo a decisiones en contextos de rehabilitación, modernización o sustitución de ascensores, alineándose con los principios de sostenibilidad, eficiencia material y descarbonización en el sector de la edificación.

4.3.2. UNIDAD FUNCIONAL

La unidad funcional constituye el parámetro de referencia que permite cuantificar y comparar de forma coherente los flujos de entrada y salida de un sistema productivo a lo largo de su ciclo de vida. En el presente estudio, la unidad funcional se ha definido como:

“El servicio de transporte vertical proporcionado por un sistema de ascensor eléctrico sin cuarto de máquinas, con capacidad para 8 personas (630 kg), a lo largo de una vida útil de 25 años, en un edificio residencial de cinco paradas y un recorrido vertical de 12,25 metros”

Esta formulación permite comparar de forma equitativa los impactos ambientales asociados a las dos configuraciones evaluadas: la instalación de un ascensor completamente nuevo y la instalación de un sistema que incorpora la reutilización de componentes clave previamente usados. Al centrarse en el servicio prestado —y no en el producto físico—, se garantiza la equivalencia funcional entre ambas opciones (Finnveden et al., 2009); en este trabajo la comparativa ha sido realizada por unidad de referencia.

La elección de una vida útil de 25 años responde a estimaciones realistas sobre la durabilidad del sistema en condiciones residenciales estándar, así como a referencias extraídas de documentación técnica del modelo EOX de TK Elevator y publicaciones del sector. Este período contempla un uso intensivo, mantenimiento periódico y condiciones de operación representativas de edificios de vivienda colectiva en Europa.

4.3.3. LÍMITES DEL SISTEMA

Para llevar a cabo una evaluación ambiental completa, se ha desglosado el ciclo de vida del ascensor siguiendo un enfoque de tipo “de cuna a tumba”, conforme a las directrices de las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, así como a los principios recogidos en la EN 15804+A2:2019 y el C-PCR-008 (TO PCR 2019:14) aplicable a ascensores.

El alcance del estudio incluye todas las fases del ciclo de vida: desde la extracción de materias primas hasta la gestión de residuos al final de su vida útil, considerando también las etapas intermedias de fabricación, transporte, instalación, operación y mantenimiento.

Cada una de estas fases se descompone en módulos informativos específicos: producción (A1–A3), transporte e instalación (A4–A5), uso y mantenimiento (B1–B7), y fin de vida (C1–

C4). Esta perspectiva garantiza la trazabilidad de los impactos ambientales desde el origen de los materiales hasta la disposición final de los residuos.

La Tabla 5 recoge los módulos de información específicamente aplicables a un ascensor, conforme a lo establecido en la Regla de Categoría de Producto C-PCR-008 (TO PCR 2019:14). Esta regla adapta los requisitos generales del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a las particularidades funcionales y técnicas de los ascensores, definiendo los módulos incluidos o excluidos, así como los criterios metodológicos a seguir. Dicha adaptación permite realizar una evaluación ambiental más representativa y alineada con las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) del sector.

Tabla 5. Límites del sistema para un ascensor

Etapa de ciclo de vida	Módulo de información		Comentario
A1-A3 Etapa de producto	A1	Suministro de materias primas	Incluido
	A2	Transporte	Incluido
	A3	Fabricación	Incluido
A4-A6 Etapa del proceso de construcción	A4	Transporte	Incluido
	A5	Instalación	Incluido
B1-B7 Etapa de uso	B1	Uso	Excluido, no aplicable a ascensores. Según C-PCR-008 (TO PCR 2019:14)
	B2	Mantenimiento	Incluido
	B3	Reparación	Excluido, según C-PCR-008 (TO PCR 2019:14)
	B4	Reemplazo	Fusionado con B5, según C-PCR-008 (TO PCR 2019:14)
	B5	Reacondicionamiento	Excluido, RSL extendido no considerado. Según C-PCR-008 (TO PCR 2019:14)
	B6	Uso de energía operativa	Incluido
	B7	Uso de agua operativa	Excluido, no aplicable a ascensores. Según C-PCR-008 (TO PCR 2019:14)
C1-C4 Etapa de fin de vida	C1	Desconstrucción	Incluido
	C2	Transporte	Incluido
	C3	Procesamiento de residuos	Incluido
	C4	Eliminación de residuos	Incluido
D Beneficios y cargas más allá del límite del sistema	D	Potencial de reutilización, recuperación y reciclaje	Incluido

Es importante señalar que, aunque también se ha modelado el módulo D —que recoge los beneficios y cargas ambientales asociados al reciclaje y recuperación de materiales más allá del sistema evaluado—, este no se ha incluido en las comparaciones cuantitativas entre escenarios, por motivos metodológicos. En concreto, el escenario de reutilización presenta un valor neto negativo en este módulo, debido a que parte de los componentes reutilizados ya no pueden ofrecer un crédito ambiental adicional al final de su vida útil. Esto genera una

distorsión en la interpretación de los resultados agregados, especialmente cuando se comparan impactos totales por unidad funcional. La decisión de excluirlo en las tablas comparativas responde, por tanto, a criterios de claridad y coherencia analítica, tal como recomiendan los principios de interpretación de resultados en ACV comparativos.

En todo caso, la exclusión del módulo D no compromete la integridad del enfoque de ciclo completo adoptado, ya que este módulo representa efectos posteriores al sistema bajo estudio (fuera de los límites definidos), y su consideración es opcional según la propia EN 15804 cuando se comunica el desempeño ambiental del producto en términos comparativos.

4.3.4. OTRAS ESPECIFICACIONES RELATIVAS AL ALCANCE DEL ACV

Se han definido procedimientos de asignación basados en criterios de masa y funcionalidad, y se han aplicado criterios de corte que excluyen flujos con contribuciones inferiores al 1 % en masa o impacto ambiental, siempre que no afecten a la validez del estudio.

Asimismo, se han establecido requisitos de calidad de los datos relacionados con su integridad, coherencia metodológica, representatividad temporal y geográfica, y fiabilidad técnica. El análisis no contempla la dimensión económica, por lo que no se consideran costos directos o indirectos asociados a los escenarios evaluados.

4.3.5. SOFTWARE Y BASE DE DATOS UTILIZADA

Para la ejecución del análisis de ciclo de vida (ACV) comparativo descrito en este estudio, se ha empleado la herramienta LCA Calculator, en su versión profesional completa, una plataforma orientada a la evaluación ambiental simplificada de productos y sistemas técnicos, que permite modelar inventarios, asignar flujos y calcular impactos a partir de metodologías de referencia. Esta herramienta resulta especialmente adecuada en el contexto académico por su accesibilidad, trazabilidad de procesos y capacidad para representar escenarios comparativos bajo supuestos controlados.

LCA Calculator permite estructurar el sistema en módulos funcionales, asociando a cada uno de ellos entradas y salidas de materia y energía conforme a la estructura modular recomendada por las normas ISO 14040 y 14044. En este caso, se han modelado por separado las fases de producción, transporte, instalación, uso y fin de vida, para ambas alternativas consideradas: ascensor nuevo completo y ascensor con reutilización parcial de componentes.

La modelización se ha basado en datos primarios del fabricante y datos secundarios procedentes de bases verificadas como Ecoinvent 3.9. En cuanto a las fuentes de datos secundarias, la herramienta opera con factores de emisión y perfiles de inventario

integrados, procedentes de bases de datos preconfiguradas que incluyen información contrastada sobre materiales, procesos de transformación, transporte y gestión de residuos. En particular, los valores empleados para materiales metálicos (acero, aluminio, cobre), plásticos técnicos y consumos eléctricos reflejan condiciones medias del contexto europeo, y han sido utilizados de manera coherente entre ambos escenarios para preservar la comparabilidad.

El cálculo de impactos se ha realizado mediante el método Environmental Footprint (EF 3.0), de acuerdo con las recomendaciones de la Comisión Europea para análisis multicriterio en productos. Este método permite cuantificar impactos en múltiples categorías relevantes, como el potencial de calentamiento global (GWP), uso de recursos fósiles, eutrofización, acidificación, partículas atmosféricas y generación de residuos, entre otras. Todos los resultados se expresan por unidad funcional y se han normalizado por los 25 años de vida útil definidos para el sistema.

La estructura modular de LCA Calculator ha facilitado la comparación entre las configuraciones evaluadas, permitiendo identificar las diferencias por etapa y componente, así como realizar ajustes en masa y composición material de los elementos reutilizados. Además, se ha validado internamente la coherencia de los datos introducidos mediante comprobaciones de balance de masas y energía, y mediante revisión cruzada con valores extraídos de la Declaración Ambiental de Producto del modelo EOX.

En conjunto, el uso de LCA Calculator ha proporcionado una plataforma robusta y transparente para el modelado del sistema, cumpliendo los requisitos metodológicos del análisis y permitiendo una evaluación reproducible de los impactos ambientales en el contexto del caso de estudio.

4.3.6. CATEGORÍAS DE IMPACTO SELECCIONADAS PARA EL ESTUDIO

La principal categoría de impacto considerada en este estudio es el Potencial de Calentamiento Global (GWP), expresado en kilogramos de CO₂ equivalente. Esta categoría ha sido priorizada debido a su relevancia internacional en la lucha contra el cambio climático y a su papel central en la mayoría de los sistemas de evaluación ambiental, tanto normativos como institucionales. Además, constituye un indicador clave en la comunicación de resultados y en la toma de decisiones en el ámbito del diseño sostenible.

No obstante, para garantizar una evaluación más completa del comportamiento ambiental del producto, se han incluido también el resto de las categorías recogidas en la norma EN 15804+A2:2019 y exigidas por el esquema de verificación de EPDs, conforme al método Environmental Footprint 3.0 de la Comisión Europea. Estas incluyen indicadores relacionados con la acidificación, la eutrofización (en medios dulceacuícolas, marinos y terrestres), el uso de recursos abióticos (minerales/metales y fósiles), así como el consumo neto de agua, cuando es aplicable.

En el análisis del ciclo de vida (ACV) se han evaluado diversas categorías de impacto, conforme a los estándares de evaluación ambiental. La siguiente tabla resume las categorías utilizadas y su significado:

Tabla 6. Explicación categorías de impacto evaluadas

Categoría	Unidad	Explicación
GWP – Potencial de calentamiento global	kg CO ₂ equivalente	Mide la contribución al cambio climático a través de emisiones de gases de efecto invernadero (como CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O).
AP – Potencial de acidificación	mol H ⁺ equivalente	Representa la emisión de sustancias que causan lluvia ácida, afectando suelos, aguas y ecosistemas
EP – Eutrofización en agua dulce	kg P equivalente	Evalúa el aporte de nutrientes (principalmente fósforo) que pueden provocar crecimiento excesivo de algas en aguas dulces.
EP – Eutrofización marina	kg N equivalente	Mide el impacto por exceso de nutrientes (nitrógeno) que afecta la eutrofización de ambientes marinos.
EP – Eutrofización terrestre	mol N equivalente	Evalúa la liberación de nitrógeno que altera el equilibrio de nutrientes en suelos y ecosistemas terrestres.
ADP – Agotamiento de recursos abióticos, minerales/metales	kg Sb equivalente	Indica el uso de recursos minerales y metales, expresado en equivalente de antimonio. Refleja escasez o agotamiento.
ADP – Agotamiento de recursos abióticos, fósiles	MJ	Mide el consumo de recursos fósiles (carbón, petróleo, gas natural), expresado en energía (mega julios).

Todas las categorías han sido evaluadas a lo largo de las distintas fases del ciclo de vida, permitiendo una interpretación multicriterio de los impactos asociados a cada escenario. Si bien el GWP es el eje principal de las representaciones gráficas comparativas, el análisis integral de los resultados tiene en cuenta la posible existencia de compensaciones entre categorías, lo que refuerza la solidez de las conclusiones.

4.4. ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

El análisis de inventario del ciclo de vida (Life Cycle Inventory, LCI) consiste en la recopilación cuantitativa de los flujos de entrada (materias primas, energía, agua) y de salida (emisiones, residuos, vertidos) asociados a cada etapa del sistema estudiado. Esta fase es fundamental dentro de la metodología de ACV, ya que proporciona los datos primarios necesarios para calcular posteriormente los impactos ambientales en las categorías seleccionadas (ISO 14040,2006).

Para el presente estudio, el inventario se ha estructurado en torno a las cinco etapas del ciclo de vida consideradas: producción, transporte, instalación, uso y fin de vida. La información recopilada ha sido adaptada a la unidad funcional definida previamente. A continuación, se describen los resultados específicos del inventario para cada una de las etapas del ciclo de vida.

4.4.1. ETAPA DEL PRODUCTO

La etapa del producto comprende todos los procesos relacionados con la extracción de materias primas, producción de materiales intermedios, y fabricación de los componentes principales del ascensor. En esta fase se han considerado los materiales empleados en la estructura, mecanismos de tracción, cabina, contrapeso, puertas de cabina y de piso, guías, bastidores, sistemas electrónicos y de control, así como los consumos energéticos asociados a su fabricación.

En el escenario de ascensor completamente nuevo, todos los componentes se modelan como de fabricación reciente. Los datos específicos de masa y tipo de material de cada componente han sido obtenidos a partir de documentación técnica del modelo EOX de TK Elevator, completados con factores medios de producción industrial y datos de base de datos secundaria. Estos valores proceden del inventario técnico de TK Elevator (2023), desarrollado en el marco del análisis.

Casi el 60% de la masa total del ascensor corresponde a metales ferrosos (principalmente acero), mientras que los materiales inorgánicos no metálicos, como el hormigón del contrapeso, representan entorno al 34%. El resto de materiales se distribuye entre plásticos y cauchos ($\approx 2\%$), materiales orgánicos ($\approx 1.5\%$), componentes eléctricos y electrónicos ($\approx 1\%$) y fracciones muy pequeñas de metales no ferrosos (aluminio) y otros ($<1\%$).

El contenido específico de materiales reciclados en el producto es indeterminado. Para los cálculos se utilizan porcentajes genéricos de las bases de datos Gabi.

Los subsistemas en los que se incluyen estos materiales son principalmente contrapeso, rieles de guía, cabina, puertas, máquina de tracción, controlador e inversor.

Se minimiza el uso de sustancias incluidas en la lista SVHC (REACH). No obstante, podrían encontrarse concentraciones > 0,1 % p/p de plomo (CAS 7439 92 1) y octametilclotetrasiloxano (D4) (CAS 556 67 2) en ciertos componentes.

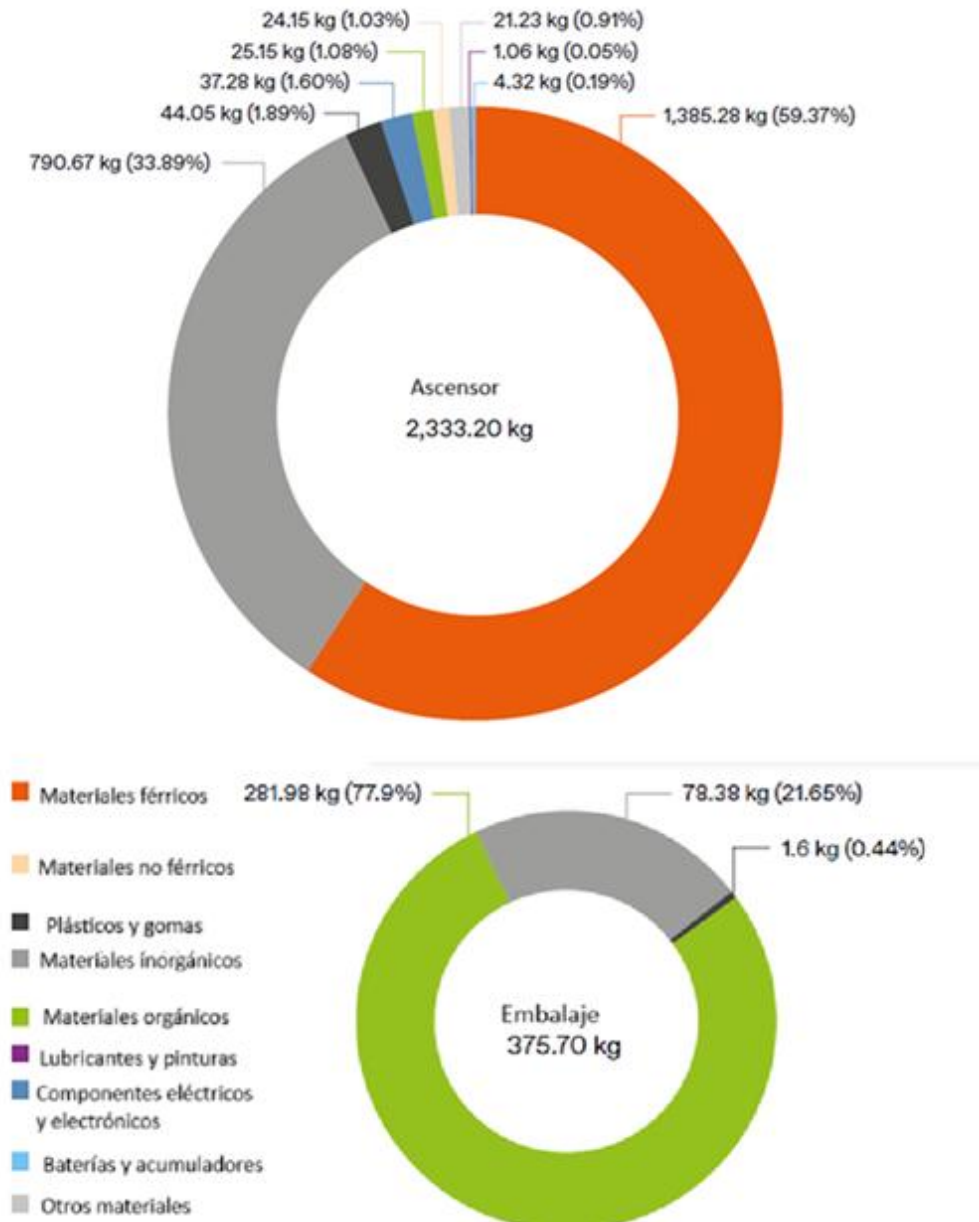


Figura 6. Balance de materiales del ascensor EOX

Entre los materiales más relevantes por su impacto se encuentran el acero estructural (presente en guías, bastidor, contrapeso y bastidor de cabina), el aluminio (empleado en algunos perfiles y carenados), el cobre (en cableado y motor), y distintos plásticos técnicos utilizados en componentes electrónicos y acabados interiores. La energía consumida durante la fabricación de estos elementos también ha sido incluida, estimada mediante factores medios de procesos industriales europeos (Peña et al., 2022).

En el escenario con reutilización, se ha considerado que las guías, los amortiguadores, el contrapeso y las puertas de piso se reutilizan sin procesos de transformación significativa, más allá de una limpieza y verificación técnica. Por tanto, los impactos asociados a su fabricación se eliminan del inventario, lo cual genera un ahorro potencial significativo en términos de emisiones de GEI, especialmente en los componentes de acero de mayor masa.

Este enfoque responde al principio de asignación del “crédito ambiental por reutilización”, permitiendo contabilizar el beneficio ambiental asociado al alargamiento de la vida útil de materiales y componentes (Ekvall & Weidema, 2004). No obstante, para garantizar una comparación conservadora, no se han asumido créditos por procesos de reciclado futuro, y únicamente se modela el impacto evitado por no producir componentes nuevos equivalentes.

Respecto al embalaje del producto, el 99% del embalaje corresponde a madera y cartón, que incorporan 165.8 kg de carbono biogénico, favoreciendo la circularidad al final de su vida útil.

Con relación al transporte, las distancias logísticas desde los centros de fabricación y proveedores hasta el lugar de instalación se han expresado en toneladas-kilómetro (tkm) y se han calculado siguiendo referencias sectoriales (García-Sanz-Calcedo et al., 2020) y prácticas logísticas documentadas por el fabricante. Con el fin de reflejar distintos patrones de suministro, se han definido tres categorías de uso:

- UC1 – Escenario de local: envíos de corta distancia, con una media asumida de 50 km, característicos de instalaciones en proximidad al centro de fabricación.
- UC2 – Escenario regional: distribución interprovincial o de alcance medio, con una distancia media asumida de 300 km.
- UC3 – Escenario de larga distancia: envíos nacionales o de exportación, con una media asumida de 800 km.

Los valores de unidad funcional de transporte asociados a cada una se recogen en la Tabla 7.

Tabla 7. Rendimiento de transporte para categorías de uso seleccionadas según PCRs

	UC1	UC2	UC3
FU [toneladas kilómetro, tkm]	129.4	323.5	776.4

4.4.2. ETAPA DE CONSTRUCCIÓN

La etapa del proceso de construcción abarca todas las actividades necesarias para la instalación del sistema de ascensor en el edificio existente, una vez que los componentes han sido fabricados y transportados a obra. Esta fase incluye el montaje mecánico y eléctrico, la utilización de equipos auxiliares, el consumo energético in situ, así como la generación y gestión de residuos temporales, como embalajes y materiales sobrantes.

La instalación incluye tareas como la colocación de las guías, el montaje del bastidor, la instalación del motor gearless, la conexión de cableado y sistemas de control, así como el ajuste y verificación del sistema completo. No se requiere sala de máquinas, lo que reduce la complejidad estructural y facilita la integración en edificios existentes.

se ha estimado un consumo medio de 2,93 Wh por trayecto, de acuerdo con la ficha técnica del modelo EOX. Esta cifra incluye el uso durante la operación normal, bajo condiciones de servicio residencial estandarizado (TK Elevator, 2023).

El consumo energético asociado a esta fase se ha estimado en 150 kWh por unidad funcional, considerando el uso de herramientas eléctricas portátiles, grúas ligeras, iluminación temporal y sistemas de comprobación eléctrica. Este valor ha sido modelado con el mix eléctrico medio de la UE-27, para el año 2023.

En cuanto a materiales auxiliares, en el inventario se contemplan los residuos generados por los materiales de embalaje empleados durante la entrega del ascensor. Estos residuos corresponden a materiales plásticos y caucho, materiales inorgánicos como el cartón, y materiales orgánicos. En obra, su gestión se lleva a cabo mediante una separación básica orientada a su valorización o eliminación, conforme a las prácticas habituales del sector.

En el escenario con reutilización parcial, aunque se reduce el volumen de materiales nuevos manipulados (guías, amortiguadores, contrapeso y puertas de piso son reaprovechados), el proceso de instalación se mantiene operativo y funcionalmente equivalente. Se asume que los componentes reutilizados llegan inspeccionados, en condiciones adecuadas de uso y sin requerir tratamientos adicionales como soldadura, mecanizado o modificación estructural. Por tanto, los consumos energéticos, operativos y de residuos se mantienen constantes en ambos escenarios para evitar sesgos comparativos.

La maquinaria empleada durante la instalación (plataformas elevadoras, polipastos, herramientas de fijación) se considera de uso compartido entre múltiples instalaciones, por lo que sus impactos se modelan como marginales. Tampoco se ha contemplado obra civil significativa, ya que se parte de la premisa de que el hueco del ascensor ya existe y se encuentra estructuralmente preparado para la instalación.

En resumen, aunque la etapa de construcción tiene un peso menor en el conjunto del ACV, su modelado preciso es importante para mantener la consistencia comparativa entre ambos escenarios y reflejar con fidelidad los flujos de materiales y energía asociados a la puesta en servicio del sistema.

4.4.3. ETAPA DE UTILIZACIÓN

La etapa de uso comprende los impactos ambientales derivados de la operación del sistema del ascensor a lo largo de su vida útil, estimada en 25 años, según especificaciones del fabricante (TK Elevator, 2023). En este estudio, el análisis de esta fase se centra en el consumo energético durante el funcionamiento diario del ascensor, ya que otros factores como el mantenimiento preventivo o la sustitución de componentes menores se han considerado marginales o equivalentes entre ambos escenarios (nuevo vs. Reutilización de componentes clave).

El ascensor analizado corresponde al modelo EOX de TK Elevator, diseñado para el transporte de pasajeros en edificios sin sala de máquinas (MRL), y dotado de un sistema de tracción eléctrica gearless de alta eficiencia. Para la unidad funcional definida, el sistema dispone de 5 paradas, una altura total recorrida de 12,25 metros, una carga nominal de 630 kg y una velocidad de 1 m/s. Se ha considerado un uso representativo de 365 días/año, en línea con aplicaciones residenciales de media intensidad.

El consumo energético anual calculado del sistema es de 520,29 kWh, con un perfil de uso estándar. Este valor se traduce en aproximadamente 13.000 kWh a lo largo de los 25 años de vida útil del ascensor.

Para la conversión de este consumo en impactos ambientales, se ha empleado el mix eléctrico promedio de la Unión Europea (UE-27) para el año 2023.

Dado que los componentes reutilizados en uno de los escenarios (guías, contrapeso, amortiguadores y puertas de piso) no influyen sobre la eficiencia energética o la demanda de energía del equipo, el impacto derivado del consumo eléctrico durante la etapa de uso se mantiene constante en ambos casos, lo que permite un análisis comparativo centrado en las fases de producción y fin de vida.

Respecto al mantenimiento, se asume un régimen estándar de inspecciones y sustituciones menores conforme a la normativa EN 81-20, sin impactos diferenciadores entre escenarios. Los consumos asociados a tareas de mantenimiento (lubricantes, recambios menores, desplazamientos técnicos) han sido considerados residuales y no modelados específicamente por su baja representatividad frente al consumo energético operativo.

En conclusión, la etapa de uso constituye el principal foco de impacto ambiental del ascensor EOX cuando se analiza exclusivamente el GWP. Esto subraya la importancia de optimizar el rendimiento energético del sistema durante el diseño y la selección de componentes, así como de considerar fuentes renovables de energía como estrategia de mitigación.

4.4.4. ETAPA DE FINALIZACIÓN DE VIDA ÚTIL

La etapa de fin de ciclo de vida del ascensor EOX considera los impactos asociados a las operaciones finales una vez alcanzada su vida útil, fijada en 25 años. Esta fase incluye los procesos de desmontaje, transporte, tratamiento y disposición final o reciclaje de los distintos componentes del sistema. En el marco de este análisis, se ha seguido un enfoque coherente con los lineamientos de las normas ISO 14040 e ISO 14044, considerando las prácticas medias actuales de gestión de residuos en el ámbito europeo.

Se ha empleado un enfoque de sistema ampliado para modelar los procesos de desmontaje, clasificación, reciclaje y eliminación. Los créditos ambientales por sustitución de materias primas se han asignado según tasas de recuperación de materiales ferrosos y no ferrosos extraídas de Ecoinvent v3.9 y de fuentes específicas del sector del reciclaje industrial (Vadenbo et al., 2014).

El modelo EOX incorpora una elevada proporción de materiales metálicos -dominados por acero y hierro fundido-, lo que le confiere un potencial significativo de reciclabilidad. En el caso base (instalación completamente nueva), se ha modelado el fin de vida suponiendo una tasa media de recuperación del 85% en peso para los materiales metálicos y un 15% destinado a vertedero o valorización energética, de acuerdo con los datos reportados en estudios de ACV aplicados a ascensores (Maccarrone et al., 2019) y en línea con Eurostat (2022).

En el escenario alternativo, en el que se reutilizan componentes clave (guías, amortiguadores, contrapeso y puertas de piso), la masa total de residuos generada al final del ciclo se reduce considerablemente, al diferirse el final de la vida útil de dichos elementos. Esta estrategia de reutilización se alinea con los principios de la economía circular, disminuyendo tanto la demanda de materias primas vírgenes como la carga ambiental asociada al tratamiento de residuos.

Para ambos escenarios, los impactos ambientales de la etapa de fin de vida se han cuantificado únicamente en término de potencial de calentamiento global (GWP), dado que es la única categoría evaluada en este estudio. Los créditos ambientales derivados del reciclaje se han contabilizado aplicando el enfoque de sustitución (conforme a la metodología del sistema ampliado), asumiendo que los materiales reciclados sustituyen parcialmente la producción de materiales primarios en un ciclo productivo futuro.

En síntesis, la reutilización de componentes no solo reduce el impacto en la fase de producción, sino que también contribuye a minimizar la generación de residuos al término del ciclo de vida. Esta estrategia representa una oportunidad real de mejora ambiental en productos de larga vida útil como los ascensores, y refuerza la necesidad de incorporar criterios de diseño para desmontaje y reutilización en las fases iniciales del desarrollo de producto.

4.4.5. POTENCIAL DE REUTILIZACIÓN, RECUPERACIÓN Y RECICLAJE

El análisis de ciclo de vida del ascensor EOX permite identificar oportunidades concretas de mejora ambiental asociadas al potencial de reutilización, recuperación y reciclaje de sus componentes al final de su vida útil. Este aspecto es particularmente relevante en el contexto de la economía circular, donde la prolongación de la vida útil de materiales y productos se traduce en una disminución significativa de los impactos ambientales globales (European Commission, 2020).

En el modelo EOX, se estima que más del 60% del peso del sistema corresponde a materiales metálicos, como acero, hierro fundido, aluminio y cobre, todos ellos con altas tasas de reciclabilidad. Los componentes estructurales como las guías, el contrapeso, los amortiguadores y las puertas de piso, además de ser robustos y duraderos, presentan un alto potencial de reutilización, siempre que su integridad funcional esté garantizada mediante inspecciones técnicas adecuadas.

En el escenario alternativo considerado en este estudio, estos componentes son reutilizados directamente en una nueva instalación, lo que implica evitar su paso por la cadena de reciclaje y, por tanto, reducir los impactos asociados tanto a la producción de nuevos materiales como al tratamiento de residuos. Esta estrategia no solo reduce la demanda de materias primas vírgenes, sino que también retrasa la generación de residuos y disminuye el consumo energético asociado al reprocesamiento de materiales.

Para los componentes no reutilizables, se ha asumido una tasa de reciclaje del 85% en peso, en línea con datos reportados por Eurostat (2022) para el sector metalúrgico en la UE. Los materiales reciclados se consideran capaces de sustituir parcialmente a materiales primarios, generando así créditos ambientales en el balance del ACV, bajo el enfoque de sistema ampliado o método de sustitución, como se recomienda en la literatura especializada (Finnveden et al., 2009).

Por otro lado, los materiales no reciclables o compuestos (plásticos, recubrimientos, cables y aislamientos) representan una fracción menor del conjunto, y se estima que su destino final será la valorización energética o el vertedero, con impactos marginales en el conjunto del análisis.

En resumen, el potencial de recuperación del ascensor EOX es elevado, y su diseño favorece estrategias de fin de vida basadas en la reutilización de elementos estructurales y el reciclaje de materiales metálicos. Esta característica posiciona al producto como una opción coherente con los objetivos de sostenibilidad del sector de la edificación y el transporte vertical, y refuerza la viabilidad de enfoques circulares en aplicaciones reales.

4.5. EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA (EICV): RESULTADOS

La Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) permite transformar los datos del inventario en resultados ambientales cuantificables, clasificados por categorías de impacto. Este proceso se ha llevado a cabo conforme a los criterios ya establecidos en el presente estudio, utilizando el método seleccionado —descrito previamente— y que incluye las categorías de impacto ambientales más relevantes para productos de construcción.

Los valores obtenidos han sido organizados por módulo del ciclo de vida y por categoría de impacto, permitiendo identificar las etapas con mayor peso ambiental en cada escenario. Estos resultados constituyen la base para su posterior interpretación en términos absolutos y relativos, lo cual se desarrolla en el apartado siguiente.

4.5.1. PERFIL AMBIENTAL DEL ESCENARIO DE REFERENCIA (ASCENSOR NUEVO)

En este apartado se presenta el perfil ambiental del ascensor nuevo, que actúa como escenario de referencia dentro de análisis comparativo. Se detallan los impactos asociados a las distintas etapas de su ciclo de vida, tomando como base los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología ACV. La caracterización incluye las categorías de impacto más relevantes, con el objetivo de establecer una línea base clara sobre la que evaluar los beneficios ambientales del escenario reacondicionado.

Tabla 8. Resultados por categoría de impacto en el Escenario de Referencia

Categoría de impacto	Unidad	Valor
GWP-total	kg CO ₂ -eq	11722
AP	Mol H ⁺ eq	34
EP-agua dulce	kg P eq	0,03
EP-agua marina	kg N eq	7
EP-terrestre	mol N eq	80
ADP-minerales	kg Sbeq	0,23
ADP-fósiles	MJ	172844

Entre los resultados obtenidos, destaca especialmente el Potencial de Calentamiento Global total (GWP-total), con un valor de 11.722 kg de CO₂ equivalente. Aunque otras categorías como el uso de recursos fósiles (ADP-fósiles) presentan valores absolutos mayores (172844 MJ), el GWP se considera especialmente relevante por su vinculación directa con el cambio climático y por ser uno de los indicadores más reconocidos y utilizados en políticas ambientales. Este impacto está principalmente asociado al consumo energético durante la fase de uso del ascensor, así como las emisiones derivadas de la producción de materiales.

A su vez, el elevado valor del ADP-fósiles evidencia una alta dependencia de fuentes de energía no renovables, lo que no solo influye en el GWP, sino que también condiciona la sostenibilidad a largo plazo del sistema. Ambos resultados refuerzan la necesidad de estrategias centradas en la eficiencia energética, la descarbonización del suministro eléctrico y el diseño sostenible desde la perspectiva del ciclo de vida.

En cambio, el agotamiento de recursos minerales y metálicos (ADP-minerales) muestra una contribución muy reducida, con un valor de apenas 0,23 kg Sb equivalente. Este resultado indica que la presión ejercida sobre recursos minerales escasos a lo largo del ciclo de vida del ascensor nuevo es limitada, lo que sugiere una baja dependencia de materiales críticos. Aunque este indicador puede adquirir mayor importancia en productos con componentes electrónicos complejos o materiales estratégicos, en el presente caso no representa un impacto ambiental prioritario frente a categorías como el GWP-total o el consumo de recursos fósiles.

A continuación, en la Figura 6 se muestra una representación porcentual del aporte relativo de cada fase del ciclo de vida a las distintas categorías de impacto evaluadas, según la metodología LCA aplicada. Este diagrama permite comparar transversalmente la distribución del impacto entre fases (módulos A1–D) dentro de cada categoría ambiental, proporcionando una visión sintética pero completa del perfil ambiental del sistema.

Cabe señalar que, aunque el potencial de calentamiento global (GWP) es en muchas ocasiones el indicador principal en el que se basan muchos estudios de ACV, la utilización de metodologías multicriterio que consideran diferentes categorías de impacto garantiza una visión holística del desempeño ambiental del producto estudiado, permitiendo detectar compensaciones entre indicadores (trade-offs), lo que resulta fundamental para el diseño de soluciones ambientalmente equilibradas (Curran, 2017).

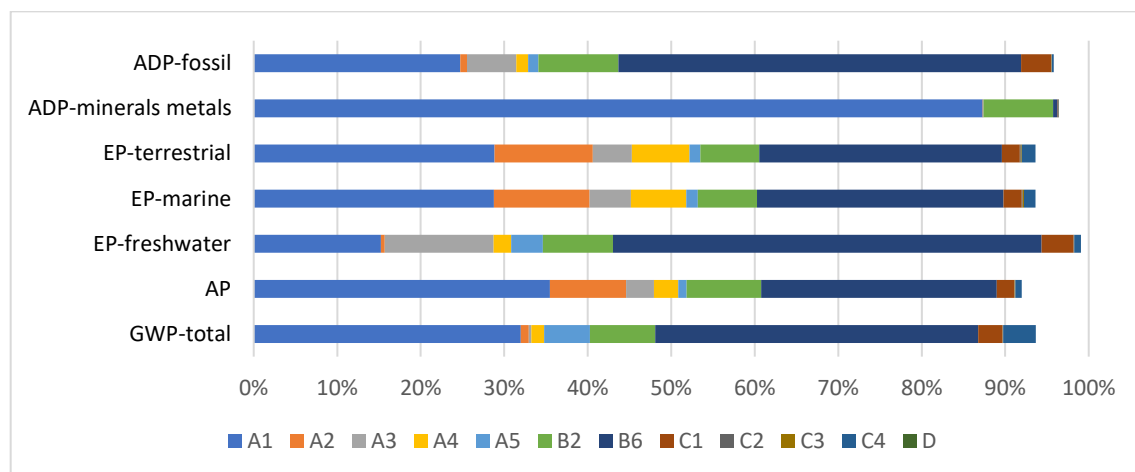


Figura 7. Porcentajes del análisis de ciclo de vida para el Escenario de Referencia

El análisis de la distribución relativa de los impactos ambientales por módulo revela una concentración clara en dos fases clave del ciclo de vida: A1 (suministro de materias primas)

y B6 (fase de uso). Estas fases dominan sistemáticamente la mayoría de las categorías de impacto, aunque con matices particulares según el indicador considerado.

En el caso del módulo A1, su contribución es predominante en las categorías directamente asociadas al uso de materiales vírgenes, especialmente ADP-minerals/metals, donde representa más del 80 % del impacto total. Esto se debe a la incorporación de materiales metálicos con alta huella ambiental, como acero, cobre, estaño o antimonio, empleados en componentes estructurales y electrónicos del ascensor. A1 también tiene un peso notable en GWP-total, AP y EP-terrestrial, reflejando el impacto del consumo energético y las emisiones industriales derivadas de procesos extractivos y de transformación primaria. Su influencia, aunque menor, también es visible en ADP-fossil, debido al uso de combustibles fósiles en las etapas de obtención de recursos.

Los módulos A2 y A3 muestran una contribución moderada en comparación con A1, pero siguen siendo relevantes. En A2, el impacto proviene del transporte de componentes desde diferentes países (como China, Brasil y Suiza), con una incidencia visible en el uso de combustibles fósiles. En A3, la fase de ensamblaje industrial genera impactos adicionales en GWP y en la categoría de eutrofización marina, debido al consumo eléctrico y al uso de materiales auxiliares en procesos de acabado y ensamblado.

Las etapas de transporte al sitio (A4) e instalación (A5) presentan valores inferiores respecto a los módulos anteriores, pero aun así muestran una huella apreciable, especialmente en GWP y ADP-fossil, debido al uso de vehículos de transporte y al tratamiento de residuos de embalaje (como madera y cartón). Aunque estas fases son puntuales en el tiempo, su intensidad depende en gran medida de la distancia recorrida y del tipo de materiales logísticos empleados.

El módulo B2 refleja impactos relacionados con el mantenimiento preventivo periódico durante toda la vida útil del ascensor. Si bien sus valores absolutos son inferiores a los de producción y uso, se evidencian contribuciones acumulativas en todas las categorías debido a la periodicidad de las intervenciones, el uso de recambios y el consumo energético asociado. Destaca su peso relativo en ADP-fossil y EP-freshwater, en línea con otros estudios que relacionan actividades de mantenimiento con el uso indirecto de recursos energéticos y materiales (Hauschild et al., 2018).

Por su parte, el módulo B6, correspondiente al uso del sistema a lo largo de 25 años, se posiciona como el segundo gran contribuyente, especialmente en aquellas categorías donde el consumo eléctrico acumulado resulta determinante. Es el módulo con mayor peso en GWP-total, debido a las emisiones asociadas al mix eléctrico europeo, que aún conserva una presencia significativa de fuentes no renovables. También lidera en ADP-fossil, como resultado de la demanda energética prolongada. En categorías como EP-freshwater, EP-marine y EP-terrestrial, B6 aparece como uno de los módulos con mayor aporte, lo que refleja la carga difusa de emisiones a lo largo de la vida útil del equipo, incluyendo contaminantes como óxidos de nitrógeno, compuestos de fósforo o residuos térmicos.

Los módulos de fin de vida (C1–C4) mantienen una participación muy limitada en la mayoría de las categorías. Aunque su impacto cuantitativo es reducido, su relevancia se vincula a aspectos cualitativos como el potencial de recuperación de materiales, la valorización energética o la minimización de residuos no reciclables. Es por ello que su análisis se considera necesario desde una perspectiva de economía circular, aunque no tenga un peso numérico comparable al de A1 o B6.

Finalmente, el módulo D, que representa las cargas y beneficios más allá del sistema, muestra valores bajos o incluso negativos en todas las categorías. Esto se debe a la inclusión de créditos ambientales por reciclaje de materiales al final de la vida útil, como metales ferrosos o componentes electrónicos. Tal como establece la norma EN 15804+A2:2019, este módulo se ha tratado exclusivamente de manera cualitativa, sin integrarse en los totales cuantitativos para mantener la neutralidad comparativa entre escenarios.

El gráfico analizado no solo permite cuantificar la relevancia de cada fase, sino también identificar posibles estrategias de mejora específicas. La elevada contribución de A1 sugiere priorizar la reducción del uso de materias primas vírgenes, mediante el uso de contenido reciclado o la selección de materiales menos impactantes. Por su parte, la carga asociada a B6 refuerza la necesidad de optimizar la eficiencia energética del sistema en uso, así como fomentar el suministro eléctrico procedente de fuentes renovables. Asimismo, el impacto no despreciable de módulos como A2, A5 y B2 pone en evidencia que las operaciones logísticas, de montaje y mantenimiento también deben ser objeto de revisión ambiental, buscando reducir desplazamientos, minimizar residuos y mejorar la eficiencia operativa.

En conjunto, la estructura del impacto ambiental en función de los módulos analizados refuerza la importancia de aplicar un enfoque multicriterio e integrado en la evaluación ambiental, teniendo en cuenta que cada categoría responde de forma diferente a las fases del ciclo de vida.

4.5.2. EVALUACIÓN DE RESULTADOS POR CATEGORÍA DE IMPACTO (ASCENSOR NUEVO)

En este apartado se analizan los resultados del Análisis de Ciclo de Vida desglosados por categoría de impacto ambiental, centrándose en los valores absolutos asociados a cada una de ellas a lo largo del ciclo de vida del ascensor nuevo.

Potencial de Calentamiento Global (GWP)

El impacto asociado al potencial de calentamiento global, medido en kg CO₂ equivalente, alcanza un valor de **11.722,33 kg CO₂-eq** para el escenario de referencia. Este impacto se encuentra fuertemente concentrado en los módulos A1 y B6, confirmando que la producción de materiales vírgenes y el consumo energético en la etapa de uso del ascensor son las fases con más impacto del ciclo de vida. La alta huella de carbono de los metales utilizados, junto con la dependencia del mix eléctrico europeo, explican este

comportamiento. El resto de los módulos presentan contribuciones significativamente menores, con valores prácticamente residuales en las etapas de fin de vida.

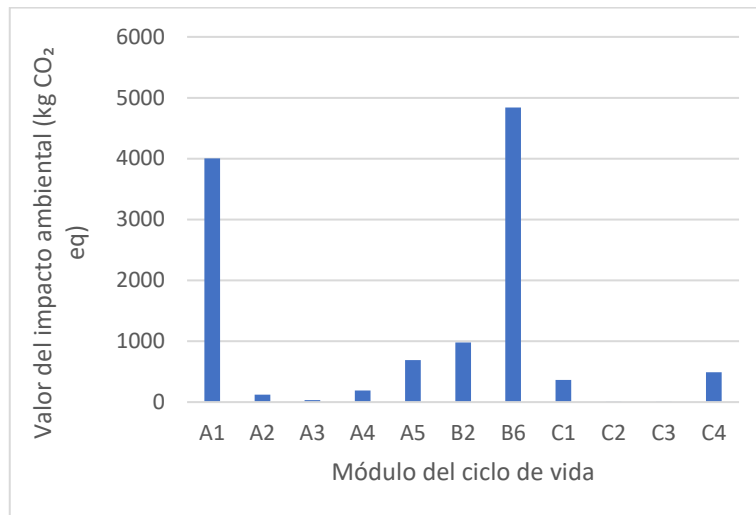


Figura 8. Contribución por módulo de ciclo de vida al Potencial de Calentamiento Global en el Escenario de Referencia

Potencial de Acidificación (AP)

El Potencial de Acidificación (AP), expresado en mol H⁺ equivalente refleja la capacidad de determinadas emisiones atmosféricas —como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO₂)— para acidificar el suelo y los ecosistemas acuáticos. Este fenómeno tiene efectos negativos sobre la biodiversidad, la calidad del agua y la productividad agrícola.

En la categoría de acidificación, medida en mol H⁺ equivalente, el impacto total del ciclo de vida asciende a **34,35 mol H⁺ eq** en el escenario de referencia. Se observa una tendencia similar: A1 y B6 son los principales responsables del impacto, con unos valores de 13,24 y 10,53 mol H⁺ eq, respectivamente, seguidos por los módulos B2 y A5. Las emisiones de óxidos de nitrógeno y azufre durante la fabricación de materiales y el uso prolongado del equipo son los principales contribuyentes. La actividad logística (A4) y la fabricación directa (A3) tienen una participación secundaria pero no despreciable, puesto que toman valor de 1,09 y 1,25 mol H⁺ eq, respectivamente.

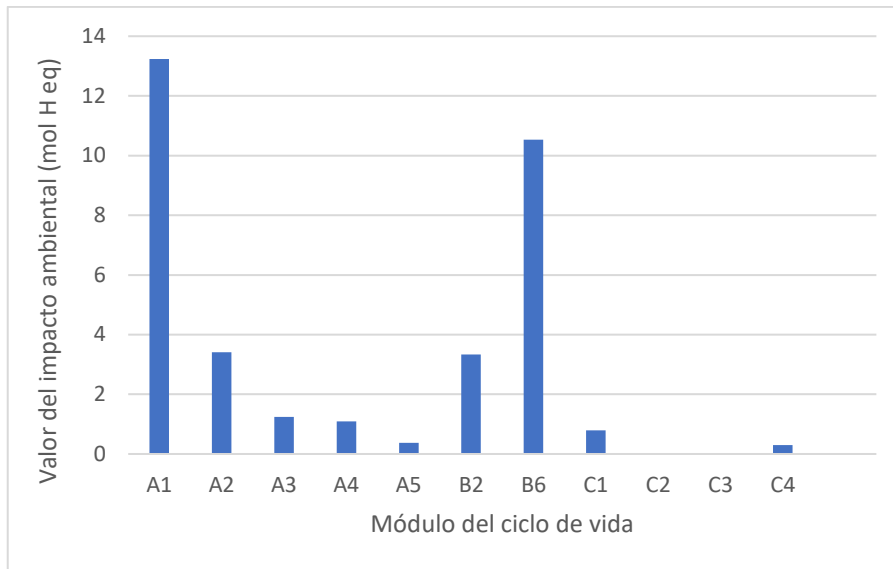


Figura 9. Contribución por módulo de ciclo de vida al Potencial de Acidificación para el Escenario de Referencia

Eutrofización de Agua Dulce (EP-freshwater)

El potencial de eutrofización en agua dulce (EP-freshwater), expresado en kg P equivalente, cuantifica las emisiones de fósforo y otras sustancias que, al llegar a medios acuáticos continentales, pueden generar proliferación de algas y degradación ecológica. Esta categoría de impacto alcanza un valor total de **0,03 kg P-eq** en el escenario de referencia. El mayor aporte proviene del módulo B6, el cual tiene un valor de 0.014 kg P-eq, lo que sugiere que el impacto está estrechamente vinculado al consumo eléctrico prolongado, debido a las emisiones difusas asociadas a la generación de energía. El módulo A1 también contribuye de forma relevante, reflejando la influencia de la producción de metales sobre ecosistemas acuáticos. El resto de fases tienen una incidencia marginal, especialmente las relacionadas con el transporte y el fin de vida.

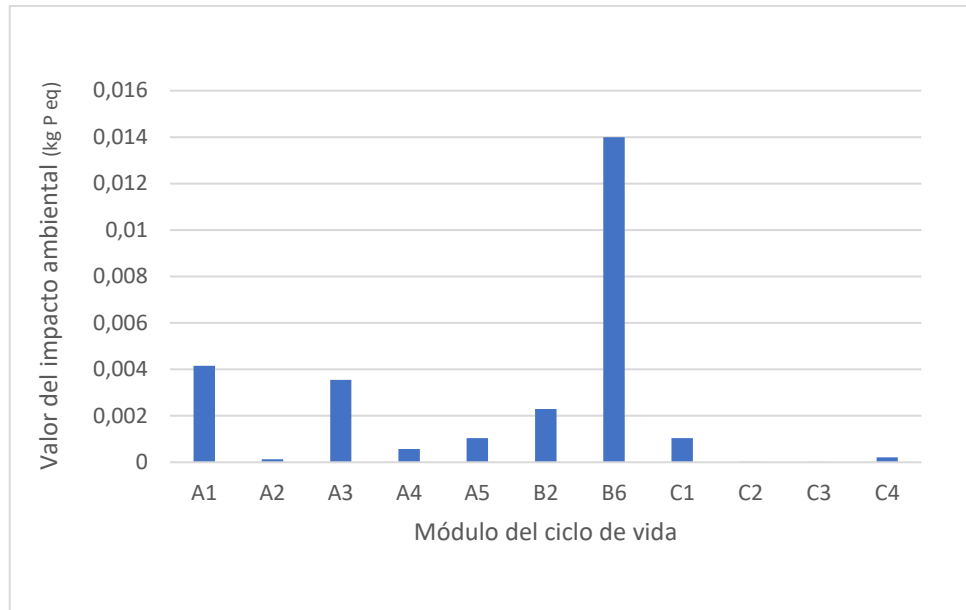


Figura 10. Contribución por módulo a la Eutrofización de Agua Dulce en el Escenario de Referencia

Eutrofización Marina (EP-marine)

El potencial de eutrofización marina (EP-marine), medido en kg N equivalente, evalúa la contribución de los distintos procesos del ciclo de vida del ascensor a la acumulación de nitrógeno reactivo en ecosistemas marinos, un fenómeno que puede provocar desequilibrios ecológicos severos como la proliferación de algas nocivas y la pérdida de biodiversidad.

Esta categoría de impacto presenta un impacto total de **7,49 kg N-eq** en el escenario de referencia. Este se distribuye de manera desigual entre los distintos módulos, destacando A1 (2,3 kg N-eq) y B6 (2,36 kg N-eq) como los principales contribuyentes, seguidos por A4 (0,53 kg N-eq) y B2 (0,57 kg N-eq). Esta distribución indica una contribución relevante tanto de las emisiones directas derivadas de procesos industriales como del transporte y mantenimiento a lo largo del ciclo de vida. A diferencia de otras categorías, aquí los módulos intermedios muestran un peso ambiental más equilibrado.

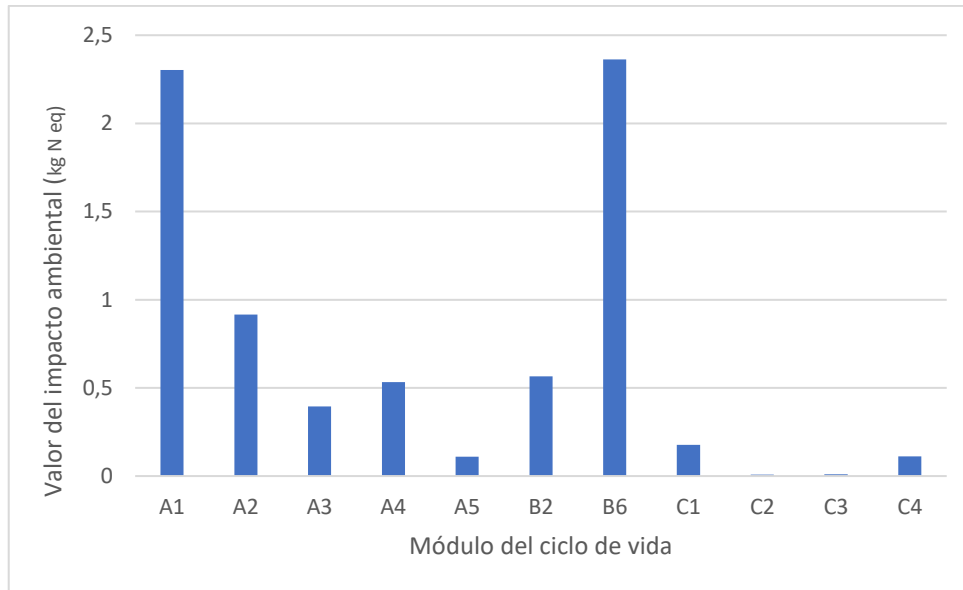


Figura 11. Contribución por módulo a la Eutrofización Marina en el Escenario de Referencia

Eutrofización Terrestre (EP-terrestrial)

El impacto sobre ecosistemas terrestres, expresado en mol de nitrógeno equivalente (mol N-eq), alcanza un valor total de **79,94 mol N-eq** en el escenario de referencia. Este impacto presenta una doble concentración en los módulos A1 y B6 con valores cercanos a los 25 mol N-eq en cada uno lo que los posiciona como los principales contribuyentes. Estas emisiones provienen mayoritariamente del uso de combustibles fósiles y del procesamiento industrial de metales. Asimismo, se aprecia una contribución secundaria en los módulos A2(10,05 mol N-eq), A4 (5,89 mol N-eq) y B2(6,02 mol N-eq), asociada principalmente al transporte mantenimiento y montaje del sistema.

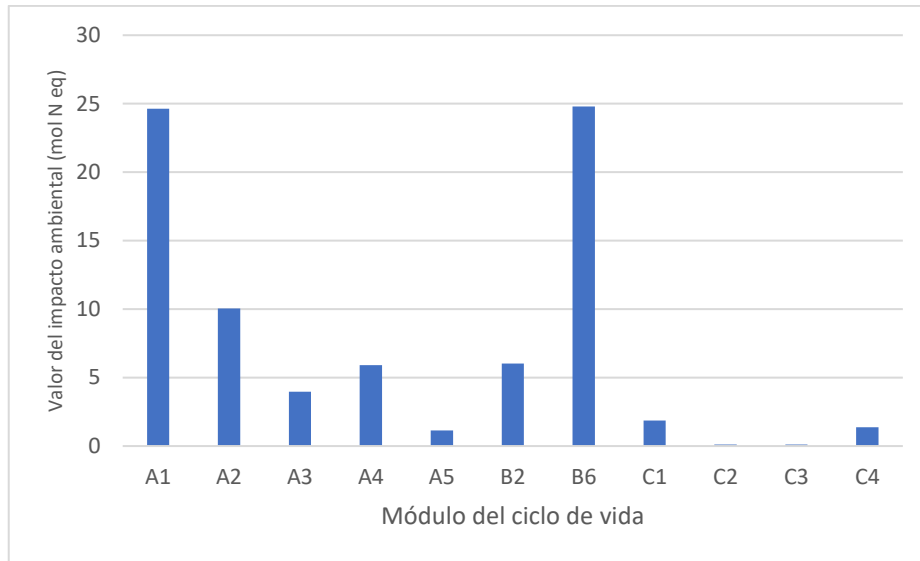


Figura 12. Contribución por módulo a la Eutrofización Terrestre en el Caso Escenario de Referencia

Agotamiento de Recursos Minerales y Metálicos (ADP-minerals/metals)

El agotamiento de recursos abióticos de tipo mineral, expresado en kg de antimonio equivalente (kg Sb-eq), presenta un valor total **de 0,23 kg Sb-eq** en el escenario de referencia. Esta categoría está prácticamente monopolizada por el módulo A1, con una contribución de 0,2 kg Sb-eq, lo que refleja el impacto de la extracción y uso de minerales escasos como el cobre o el antimonio en los componentes del ascensor. Además, se observa una pequeña contribución del módulo B2, con un valor de 0,02 kg Sb-eq, asociada previsiblemente a tareas de mantenimiento o sustitución de piezas. Los módulos restantes tienen una contribución casi nula, lo que confirma que esta categoría depende casi exclusivamente del origen y cantidad de materias primas vírgenes empleadas.

Los módulos restantes tienen una contribución casi nula, lo que confirma que esta categoría depende casi exclusivamente del origen y cantidad de materias primas vírgenes empleadas.

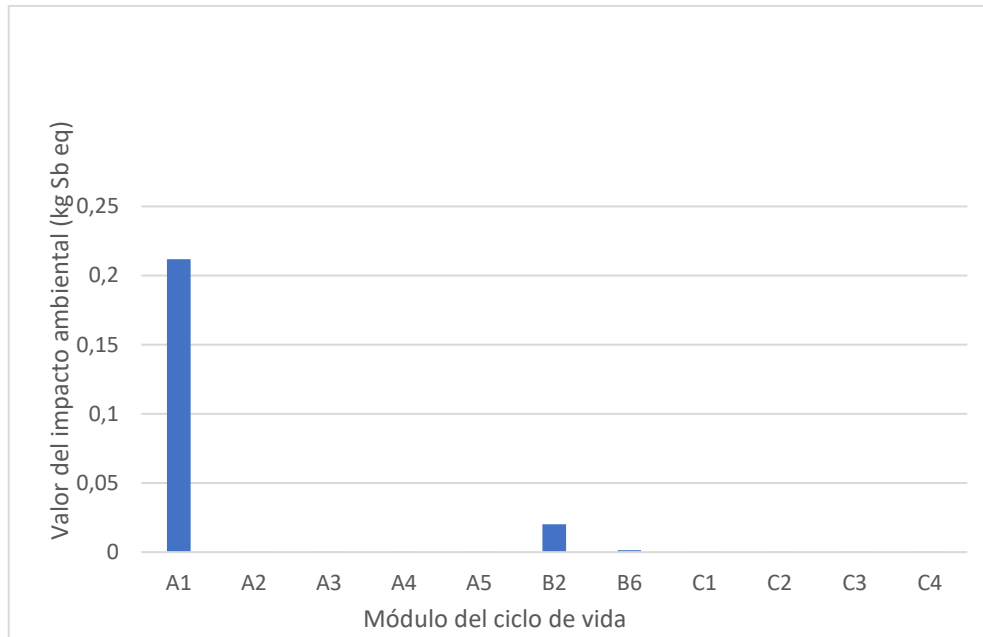


Figura 13. Contribución por módulo al Agotamiento de Recursos Minerales y Metálicos en el Escenario de Referencia

Agotamiento de Recursos Fósiles (ADP-fossil)

El agotamiento de recursos fósiles, expresado en megajulios netos (MJ), alcanza un valor total de **172.843,68 MJ** en el escenario de referencia. Este impacto se concentra principalmente en B6, donde toma un valor de 87.028 MJ debido al consumo acumulado de electricidad a lo largo de los 25 años de operación del ascensor. Le siguen A1 (44.601 MJ), por el uso de procesos extractivos y metalúrgicos intensivos, y B2 (17.323 MJ), relacionado con las actividades de mantenimiento. El resto de módulos presentan contribuciones muy limitadas, lo que resalta el peso de las fases energéticas en este indicador.

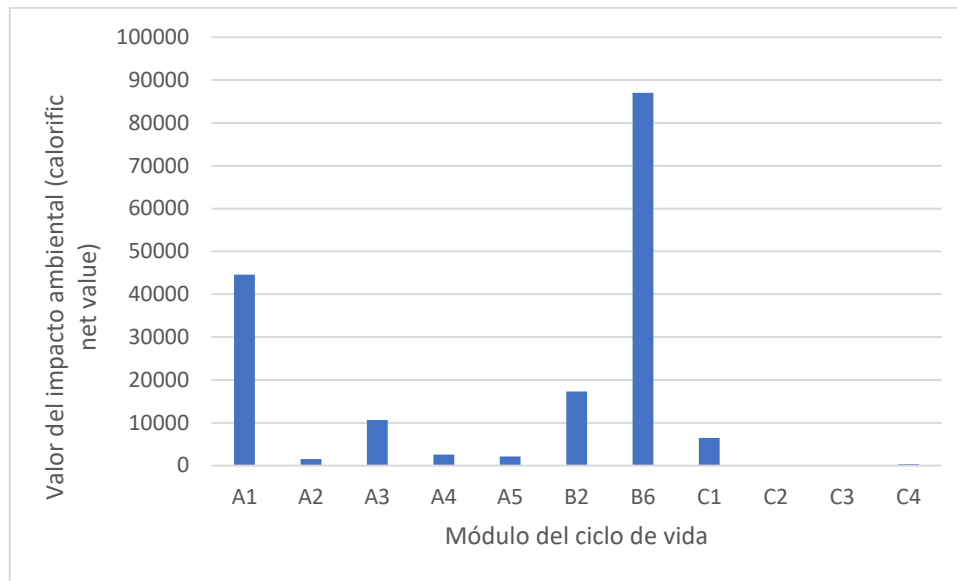


Figura 14. Contribución por módulo al Agotamiento de Recursos Fósiles en el Escenario de Referencia

Los resultados obtenidos sientan las bases para el análisis comparativo entre el caso base y el caso de estudio, que se desarrollan a continuación.

4.6. PERFIL AMBIENTAL DEL ASCENSOR REHABILITADO Y ESTUDIO COMPARATIVO

En la Tabla 9 se recogen los resultados del Análisis de Ciclo de Vida para el escenario reacondicionado, desglosados por categoría de impacto ambiental.

En este escenario, el análisis muestra una mejora generalizada respecto al ascensor nuevo, especialmente en los indicadores más representativos. El Potencial de Calentamiento Global (GWP-total) se reduce a 9.097 kg CO₂-eq, lo que supone una disminución significativa respecto al escenario de referencia, reflejando un menor uso de energía y materiales vírgenes. También se observa una reducción destacada en el consumo de recursos fósiles (ADP-fósiles), con un valor de 145.622 MJ, lo que refuerza el beneficio ambiental del reacondicionamiento en términos de eficiencia energética.

El resto de las categorías, como la acidificación con 27,5 mol H⁺-eq o la eutrofización terrestre con 62 mol N eq, también presentan valores más bajos en comparación con el sistema nuevo, aunque en menor medida. Resulta especialmente relevante que el impacto asociado al uso de recursos minerales y metales (ADP-minerales) se mantenga en 0,23 kg Sb-eq, lo que sugiere que ciertos componentes clave no han sido sustituidos o que el reacondicionamiento ha implicado igualmente materiales críticos.

En conjunto, estos resultados reflejan el potencial del reacondicionamiento como estrategia de economía circular con beneficios ambientales medibles a nivel de múltiples categorías de impacto.

Tabla 9. Resultados por categoría de impacto para el escenario reacondicionado

Categoría de impacto	Unidad	Valor
GWP-total	kg CO ₂ -eq	9097
AP	Mol H ⁺ eq	27,5
EP-agua dulce	kg P eq	0,24
EP-agua marina	kg N eq	5,82
EP-terrestre	mol N eq	62
ADP-minerales	kg Sbeq	0,23
ADP-fósiles	MJ	145622

Una visión global de la distribución porcentual del impacto por módulo puede observarse en la Figura 15 para el ascensor reacondicionado. En ella se aprecia que los módulos A1 (suministro de materias primas) y B6 (uso energético durante la fase de uso) siguen concentrando la mayor parte de los impactos en casi todas las categorías, siendo especialmente dominante A1 en ADP-fossil, ADP-minerals/metals y GWP-total, donde supera el 80 % del impacto. B6, por su parte, sigue presentando una relevancia destacada en categorías como EP-marine, EP-terrestrial y EP-freshwater, reflejando la importancia del consumo energético durante la operación del sistema. En general, la reutilización de componentes en este escenario circular permite desplazar parcialmente los impactos desde las fases iniciales hacia otras del ciclo de vida, como el mantenimiento (B2) y el fin de vida (C1–C4), aunque con contribuciones comparativamente menores. Esta redistribución genera un perfil ambiental más equilibrado respecto al caso de referencia, donde A1 y B6 dominaban de forma más absoluta.

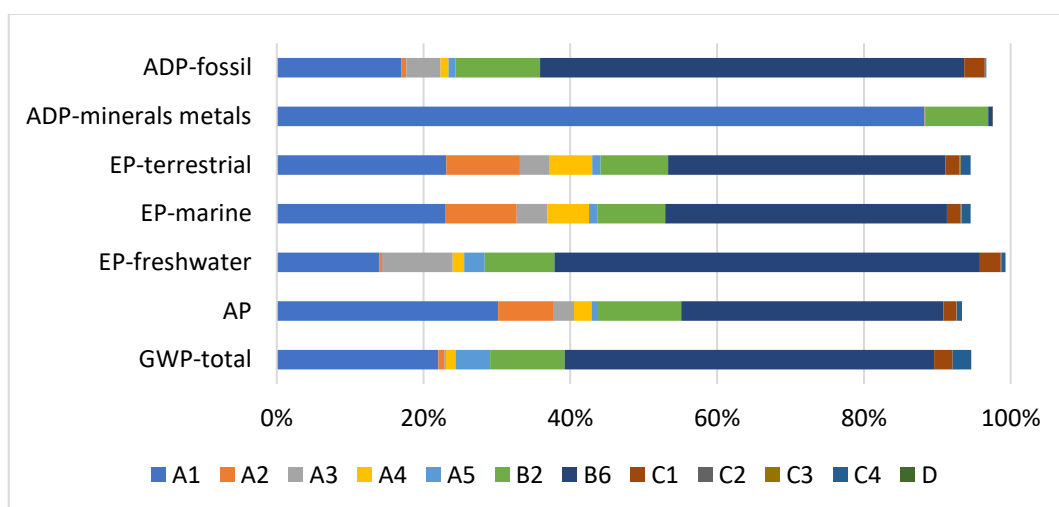


Figura 15. Porcentajes del análisis de ciclo de vida para el Ascensor Reacondicionado

Para poder apreciar el efecto del uso de piezas reutilizadas en el ascensor en los impactos asociados al ciclo de vida del ascensor, a continuación, se presentan los resultados por categoría de impacto y módulo informativo (A1–C4), para los dos enfoques evaluados.

Potencial de Calentamiento Global (GWP)

Tal como se observa en la Figura 16 el caso de estudio (ascensor reacondicionado) presenta una reducción total del GWP del 34,9 % respecto al caso base. Esta mejora ambiental se debe principalmente al uso de materiales reutilizados y al rediseño de componentes clave, lo que reduce significativamente la necesidad de procesos industriales intensivos en carbono, como la producción de acero y cobre.

El módulo A1, correspondiente al suministro de materias primas, muestra la mayor disminución relativa, con una caída del 47,14 %, debido a la reutilización de elementos estructurales como guías, contrapeso, amortiguadores y puertas. Esta estrategia evita la fabricación de nuevos materiales vírgenes, que representan una parte sustancial de la huella de carbono del ascensor en su etapa inicial.

Aunque el módulo A2, relacionado con el transporte de materias primas, mantiene un valor similar en ambos escenarios, se observa una ligera mejora en el reacondicionado. Esto podría deberse a la reducción en volumen y peso de los materiales transportados al prescindir de componentes nuevos, aunque su contribución al impacto total es poco significativa.

Por su parte, el módulo B6, asociado al consumo energético durante los 25 años de uso, sigue siendo el principal responsable del impacto climático en ambos escenarios. Las emisiones generadas en esta fase no presentan variación, ya que el rendimiento energético del sistema permanece constante al no modificarse ni el grupo tractor ni la unidad de control.

Finalmente, otras fases como A5 (proceso de instalación) o B2 (mantenimiento) también muestran ligeras reducciones, pero con un peso menor en el total. Asimismo, los módulos de fin de vida (C1–C4) presentan una participación marginal.

En conjunto, los resultados ponen de manifiesto que la mayor ventaja ambiental del ascensor reacondicionado en términos de GWP se concentra en la etapa de producción, validando la eficacia de las estrategias de modernización selectiva y reutilización de componentes para mitigar las emisiones de GEI en el sector de la elevación vertical.

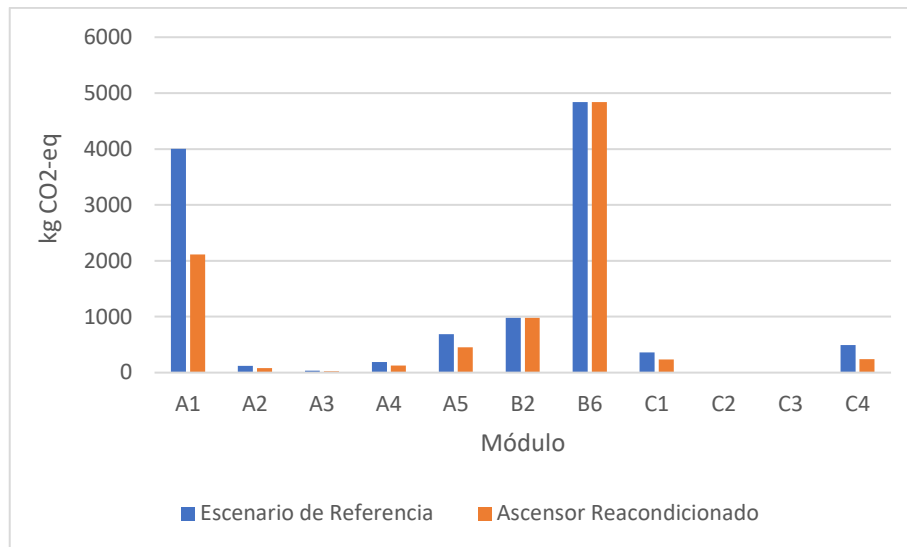


Figura 16. Comparación de GWP en ambos casos

Potencial de Acidificación (AP)

Tal como se observa en la Figura 17, la mayor diferencia se registra en el módulo A1, relativo al suministro de materias primas, con una disminución del 32,92 %. Esta mejora se debe a la reutilización de componentes estructurales, como guías, contrapeso, amortiguadores y puertas, que permite evitar procesos industriales intensivos en emisiones acidificantes, como la fundición, galvanizado y tratamiento térmico de metales nuevos.

En los módulos de fabricación e instalación (A2–A5) también se observa una mejora generalizada en torno al 34,5 %, aunque su contribución al impacto global es moderada. En el caso concreto del módulo A2 (transporte), la diferencia es más contenida, lo que se justifica por el hecho de que, si bien el reacondicionado reduce el volumen de materiales transportados, las rutas y medios de transporte empleados siguen siendo similares.

Por su parte, los módulos B2 (mantenimiento) y B6 (uso) —que corresponden a las fases operativas del ascensor— presentan valores prácticamente idénticos en ambos escenarios. Esto se debe a que el reacondicionamiento no implica alteraciones en el grupo tractor ni en el sistema de control, lo que mantiene constante el consumo energético y la frecuencia de intervenciones de mantenimiento. No obstante, B6 sigue siendo uno de los mayores contribuyentes al impacto total en AP, dado que depende del mix eléctrico europeo, que aún incluye una proporción significativa de fuentes fósiles generadoras de emisiones acidificantes.

Finalmente, las fases de fin de vida (C1–C4) muestran un impacto ambiental bajo en ambos escenarios, con una mejora modesta en el reacondicionado. Esta reducción está vinculada a la menor cantidad de residuos y materiales desechados al final del ciclo, consecuencia directa de la estrategia de recuperación previa.

En conjunto, los resultados permiten concluir que la estrategia de reacondicionamiento contribuye a una reducción del potencial de acidificación cercana al 32 %. Este descenso se

concentra mayoritariamente en la fase de producción (A1–A5), donde se evita la fabricación de nuevos materiales y procesos emisores, reforzando la idea de que el rediseño basado en criterios circulares no solo reduce la huella de carbono, sino también otros impactos como la acidificación del entorno.

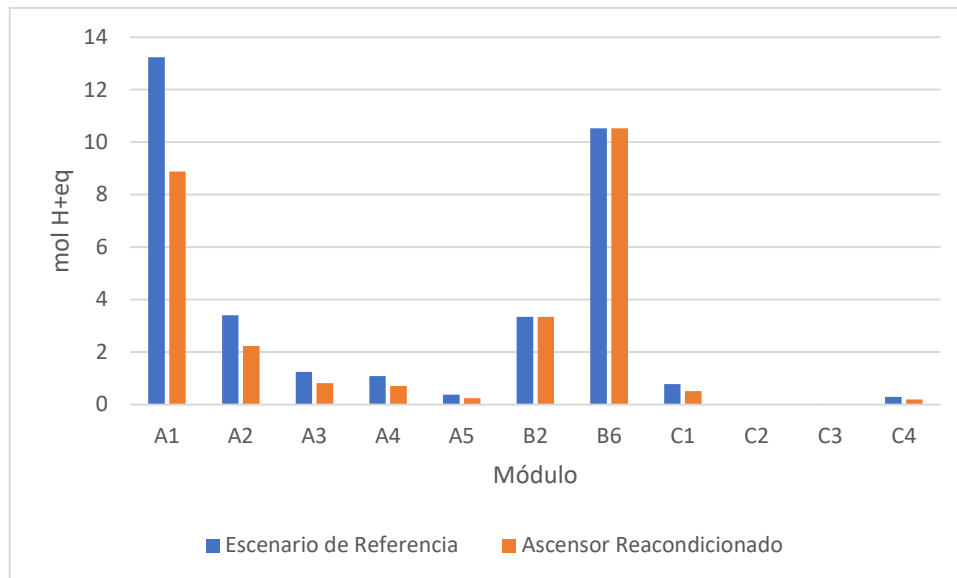


Figura 17. Comparación AP en ambos escenarios

Eutrofización de Agua Dulce (EP-freshwater)

Tal como muestra la Figura 18, el impacto está claramente dominado por el módulo B6, correspondiente al consumo eléctrico durante los 25 años de uso del ascensor. En ambos escenarios —ascensor nuevo y reacondicionado— los valores de B6 son prácticamente idénticos, debido a que no se han introducido cambios en el grupo tractor ni en el sistema de control. La similitud también se observa en el módulo B2, asociado al mantenimiento, ya que las tareas y frecuencias de intervención se mantienen sin variaciones sustanciales.

En contraste, otros módulos como A1 y A3 sí muestran reducciones significativas en el escenario reacondicionado. Esto se debe principalmente a la reutilización de elementos estructurales, que permite evitar procesos industriales intensivos en consumo de recursos y generación de contaminantes acuáticos. De manera adicional, aunque con una contribución menor, los módulos A2, A4, A5 y C1–C4 también reflejan una mejora ambiental, relacionada con la reducción en el transporte, la instalación y el volumen de residuos finales.

En conjunto, la estrategia de reacondicionamiento permite alcanzar una reducción total cercana al 30 % en el EP-freshwater, demostrando que, aunque el impacto durante la fase de uso sigue siendo dominante, la mejora en las etapas iniciales del ciclo de vida tiene un efecto relevante sobre esta categoría ambiental.

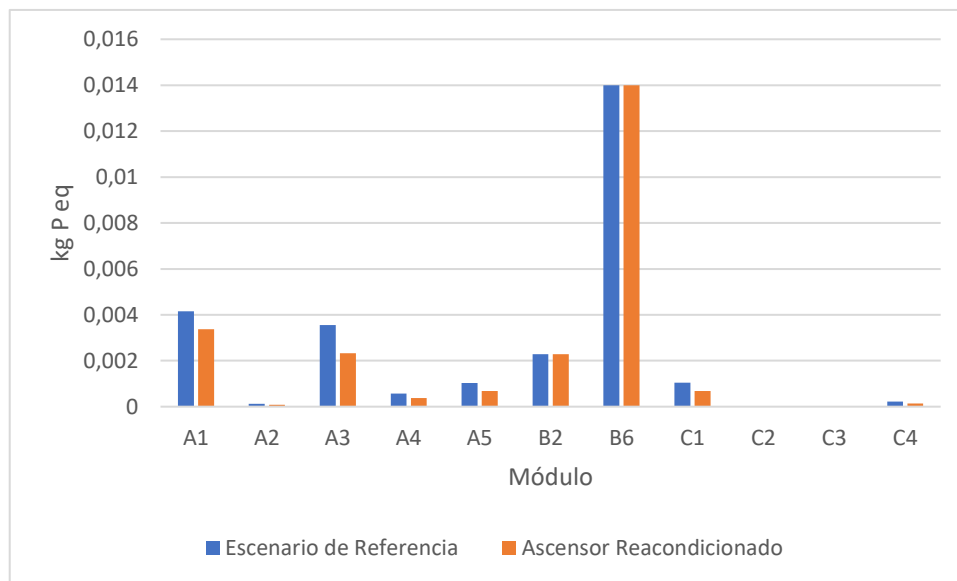


Figura 18. Comparación EP agua dulce en ambos escenarios

Eutrofización Marina (EP-marine)

Tal como se observa en la Figura 19, el módulo B6 es el principal responsable del impacto en ambos escenarios, con valores prácticamente iguales. Esto se debe a que el sistema tractor y el control no se modifican, manteniéndose constante la eficiencia energética entre el ascensor nuevo y el reacondicionado. Del mismo modo, el módulo B2 también presenta impactos muy similares en ambos casos, al no existir variaciones significativas en frecuencia o tipo de intervención.

Por otro lado, el módulo A1 —relativo al suministro de materias primas— aparece como el segundo mayor contribuyente en esta categoría. En el escenario reacondicionado se aprecia una reducción considerable del impacto en A1, atribuida a la reutilización de componentes metálicos estructurales, como guías, contrapeso y puertas de piso. Estos elementos, al no requerir nuevas materias primas, evitan emisiones relacionadas con la producción de acero, cobre y otros materiales con alta huella ambiental. Asimismo, los módulos A2 y A3 también muestran reducciones importantes, derivadas de una menor actividad logística y un menor volumen de transformación industrial.

Los módulos restantes, incluyendo A4, A5 y los de fin de vida (C1–C4), tienen una contribución marginal al impacto total en esta categoría, aunque también se benefician de pequeñas mejoras en el escenario reacondicionado.

En conjunto, el reacondicionamiento permite una reducción del 34 % en el potencial de eutrofización marina, concentrando los mayores beneficios en la fase de suministro y

transformación de materiales. Este resultado subraya la efectividad de la estrategia de modernización selectiva para mitigar impactos ambientales incluso en categorías menos evidentes como la contaminación de ecosistemas marinos.

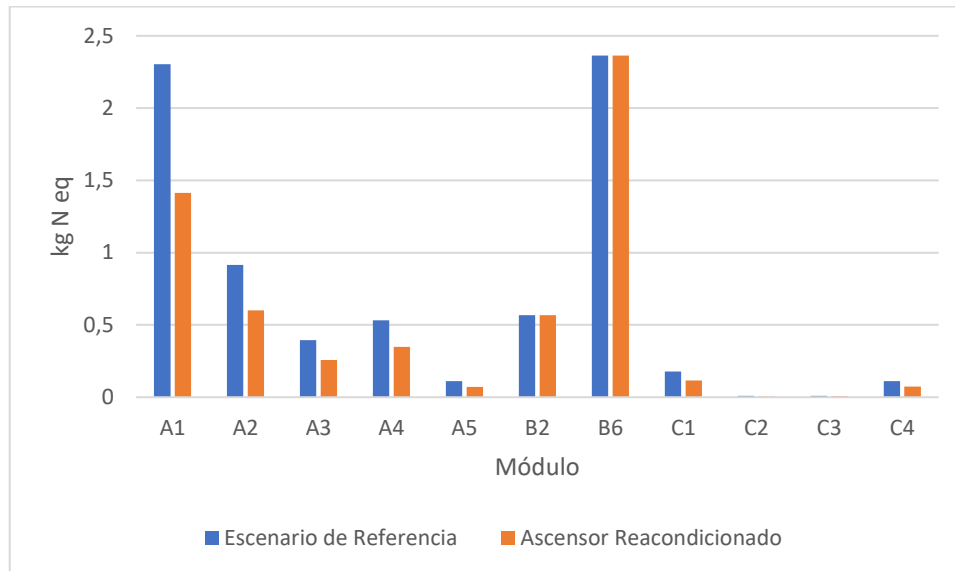


Figura 19. Comparativa EP-marine en ambos escenarios

Eutrofización Terrestre (EP-terrestrial)

Como se muestra en la Figura 20, en el caso de la eutrofización terrestre, los módulos B6 y A1 son los que más contribuyen al impacto total en ambos escenarios. En el caso del módulo B6, el valor se mantiene prácticamente idéntico entre el ascensor nuevo y el reacondicionado, ya que el rendimiento energético del equipo no cambia tras el reacondicionamiento. El impacto de B2 también es muy similar en ambos casos, dado que la frecuencia y tipo de mantenimiento se conservan constantes.

Por el contrario, se observa una reducción significativa del impacto en los módulos A1, A2, A3 y A4 en el escenario reacondicionado. En A1, el descenso se debe a la menor demanda de materias primas vírgenes gracias a la reutilización de componentes lo que evita procesos metalúrgicos intensivos en emisiones. En A2, se reducen las emisiones derivadas del transporte de materiales debido a una logística más simple y eficiente. En A3, disminuyen los impactos ligados a la transformación industrial, al evitar la fabricación de nuevos componentes. Y en A4, la reducción responde a un menor transporte hacia el emplazamiento final del ascensor reacondicionado.

Los módulos A5 y C1–C4 presentan una contribución marginal al impacto total, aunque también muestran mejoras menores en el escenario reacondicionado.

En conjunto, los resultados indican una reducción del 34,5 % en el EP-terrestrial, atribuida principalmente a las optimizaciones realizadas en las fases de producto y transporte. Esto

subraya el valor ambiental del reacondicionamiento como estrategia eficaz para minimizar las emisiones relacionadas con el ciclo de vida de los ascensores.

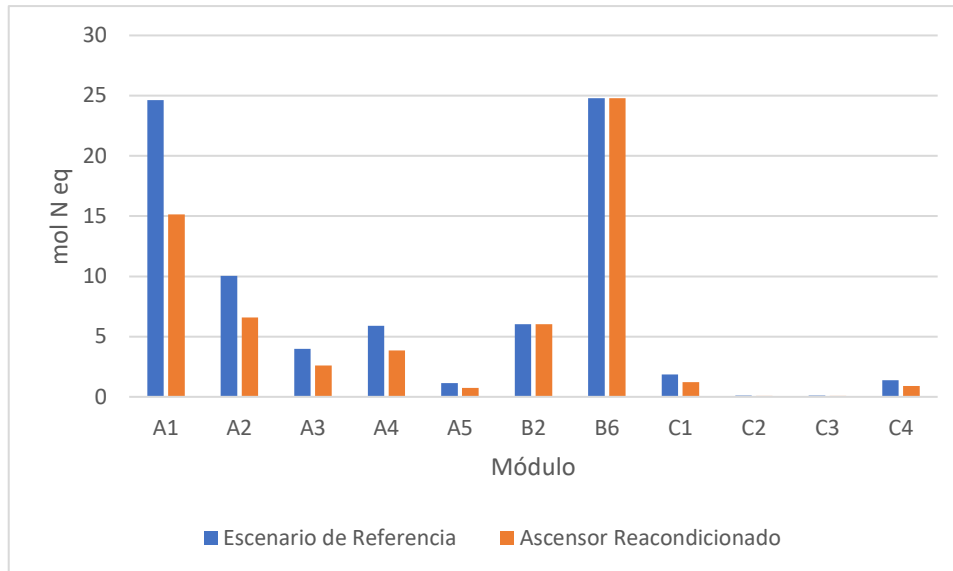


Figura 20. Comparativa AP-terrestrial en ambos escenarios

Agotamiento de Recursos Fósiles (ADP-fossil)

En lo que respecta al agotamiento de recursos fósiles, la Figura 21 evidencia que el impacto está fuertemente dominado por el módulo B6, correspondiente al consumo eléctrico durante los 25 años de uso del ascensor. Este comportamiento es consistente en ambos escenarios, ya que no se han introducido mejoras en la eficiencia energética ni cambios en el sistema de tracción o control, por lo que el consumo acumulado de electricidad permanece constante.

El segundo mayor contribuyente en esta categoría es el módulo A1, debido a la energía embebida en la extracción y transformación de materias primas, especialmente metales como acero, aluminio y cobre. En este punto, el escenario reacondicionado muestra una reducción notable.

En conjunto, estas mejoras permiten alcanzar una reducción global del 33,91 % en el ADP-fossil en el escenario reacondicionado frente al de referencia. Este resultado pone de manifiesto que, si bien el consumo energético en uso continúa siendo la principal fuente de agotamiento de recursos fósiles, las estrategias de reacondicionamiento pueden disminuir significativamente la energía embebida en las fases iniciales y de mantenimiento, mejorando así el perfil ambiental global del sistema sin comprometer su funcionalidad.

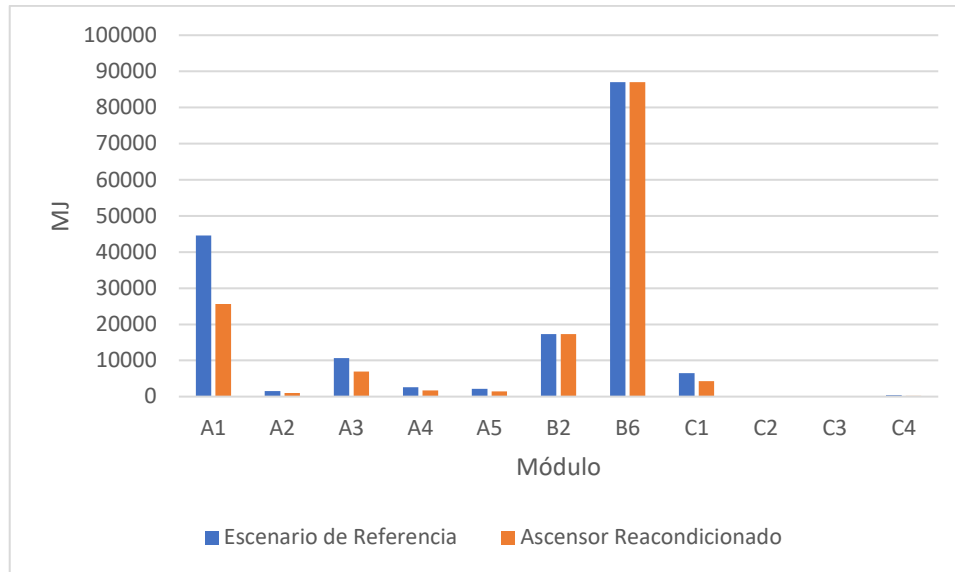


Figura 21. Comparativa ADP-fossil en ambos casos

Agotamiento de Recursos Minerales y Metálicos (ADP-minerals/metals)

De acuerdo con la Figura 22, en el Agotamiento de Recursos Minerales y Metálicos, el impacto total de esta categoría se concentra principalmente en el módulo A1 y B2, tanto en el escenario base como en el reacondicionado.

El módulo A1 es el principal implicado en ambos escenarios. En el reacondicionado, se aprecia una ligera reducción, atribuible a la reutilización de componentes estructurales que permite evitar parcialmente la extracción de metales escasos como cobre o antimonio. No obstante, al mantenerse componentes clave como el grupo tractor o el sistema de control, que contienen materiales críticos, la diferencia no es sustancial.

El segundo módulo en relevancia es B2, correspondiente al mantenimiento a lo largo del ciclo de vida. También aquí se aprecia una leve mejora en el caso reacondicionado, resultado de una menor necesidad de repuestos nuevos y operaciones técnicas, aunque la contribución al impacto total es mucho menor en comparación con A1.

El resto de los módulos —incluidos A2, A3, B6 y los de fin de vida— presentan valores prácticamente nulos, por lo que su influencia en esta categoría es marginal.

En conjunto, estos resultados indican que el reacondicionado no elimina por completo la necesidad de materiales con alta escasez, pero sí permite reducir parcialmente su demanda en fases clave, como la fabricación inicial y el mantenimiento. Aunque el potencial de mejora en ADP–minerals/metals es limitado, el descenso observado refuerza la viabilidad ambiental del enfoque circular adoptado, produciéndose una reducción del 34%.

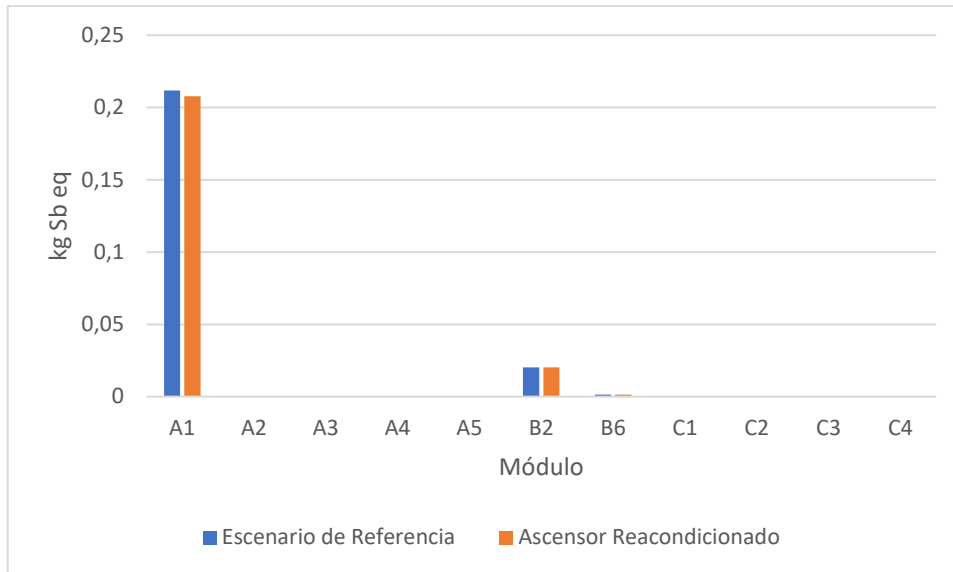


Figura 22. Comparativa ADP-minerals/metals en ambos casos

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que la implementación de estrategias de economía circular, concretamente mediante la reutilización parcial de componentes en el modelo de ascensor evaluado, genera beneficios ambientales significativos y cuantificables.

En términos generales, se observa que el ascensor reacondicionado presenta una reducción notable en la mayoría de los indicadores ambientales, especialmente en aquellos directamente asociados al uso de materias primas vírgenes, como el potencial de calentamiento global (GWP), el agotamiento de recursos minerales (ADP-minerals/metals) y el uso de combustibles fósiles (ADP-fossil). Esta mejora se concentra principalmente en los módulos A1–A3, que se ven reducidos al reutilizar componentes previamente fabricados como guías, contrapeso o puertas de rellano. La fase de uso, en cambio, permanece invariable, lo que sugiere que las estrategias circulares son especialmente efectivas cuando se centran en evitar la producción de nuevos materiales sin comprometer la funcionalidad del sistema.

Más allá de las mejoras desde el punto de vista ambiental, cabe destacar que este enfoque también presenta implicaciones relevantes a nivel empresarial. La reutilización de componentes permite reducir costes asociados a la adquisición de materias primas y a la fabricación de piezas nuevas, al tiempo que mejora la percepción externa de la marca frente a regulaciones ambientales y expectativas del mercado. En un contexto donde la sostenibilidad se ha convertido en un factor estratégico, las empresas que incorporan principios de economía circular en sus procesos de diseño, mantenimiento y renovación de productos se posicionan de forma más competitiva frente a normativas futuras, criterios de contratación verde y políticas de descarbonización industrial.

Por tanto, este trabajo no solo valida técnicamente la viabilidad ambiental del reacondicionamiento parcial de ascensores, sino que también subraya su relevancia operativa, económica y estratégica dentro del sector de la edificación y la movilidad vertical.

6. Referencias

- AENOR. (2019). *UNE-EN 15804:2012+A2:2019. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción*. Asociación Española de Normalización.
- Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2005). Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board. *Energy and Buildings*, 37(6), 561–572. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.009>
- Bare, J. C. (2011). TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(5), 687–696. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0338-9>
- Baumann, H., & Tillman, A.-M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application*. Studentlitteratur.
- Bocken, N. M. P., Bakker, C., & Pauw, I. de. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- CEN. (2012). *EN 15804:2012+A2:2019 - Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*. European Committee for Standardization.
- Consejo de la Unión Europea. (2024, 27 de enero). *Cambio climático: lo que está haciendo la UE*. <https://www.consilium.europa.eu/es/politicias/climate-change/what-the-eu-is-doing/>
- Corvellec, H., Stowell, A. F., & Johansson, N. (2021). Critiques of the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), 336–348. <https://doi.org/10.1111/jiec.13187>
- Curran, M. A. (2012). *Life Cycle Assessment Handbook: A guide for environmentally sustainable products*. Wiley.
- Curran, M. A. (2017). *Life Cycle Assessment Student Handbook*. John Wiley & Sons.
- Del Borghi, A. (2013). LCA and communication: Environmental Product Declaration. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(2), 293–295. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0523-9>
- ECOPLATFORM. (2024). *Guidelines for EPD of Construction Products in Europe*. <https://www.ecoplatform.org>
- EPD International AB. (2023). *Environmental Product Declaration – EOX Lift (S-P-08258)*. <https://environdec.com/library/epd9507>
- EPD International. (2023). *General Programme Instructions for the International EPD® System (Version 4.0)*. The International EPD® System. <https://www.environdec.com>
- Ecoinvent Centre. (2022). *Ecoinvent database v3.9*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Ekvall, T., & Weidema, B. P. (2004). System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(3), 161–171. <https://doi.org/10.1065/lca2004.03.148>

- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation.
- European Commission. (2010). *ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance*. Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.
- European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe* (COM(2020) 98 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>
- European Commission. (2021). *Product Environmental Footprint (PEF) Guide*. Brussels: Joint Research Centre. https://ec.europa.eu/environment/eusds/smgp/pdf/PEF_methodology_final.pdf
- Eurostat. (2022). *Recycling rates in the EU: Waste statistics*. European Commission. <https://ec.europa.eu/eurostat>
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... & Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- García-Sanz-Calcedo, J., García-Sanz, V., & López-Rodríguez, F. (2020). Environmental impact of elevator systems in residential buildings. *Journal of Building Engineering*, 28, 101029. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101029>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2013). *ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level*. RIVM / PRé Sustainability.
- González-Bautista, C., Cabeza, L. F., & Boer, D. (2022). Life cycle assessment of lift systems: A comparative analysis of modernization scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 339, 130604. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130604>
- Government of Spain. (2020). *España Circular 2030: Estrategia Española de Economía Circular*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es>
- Guinée, J. B. (Ed.). (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational guide to the ISO standards*. Springer.
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (Eds.). (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Hunt, R. G., Sellers, J. D., & Franklin, W. E. (1992). Resource and environmental profile analysis: A life cycle environmental assessment for products and procedures. *Environmental Impact Assessment Review*, 12(3), 245–269.
- ifu Hamburg. (2024). *Umberto LCA+ Product Page*. <https://www.ifu.com/umberto/lca-software/>
- Institut Bauen und Umwelt. (2023). *Environmental Product Declaration: Elevator model EOX*. IBU. <https://environdec.com/library/epd9507>
- Instituto Nacional de Estadística [INE]. (2023). *Contabilidad ambiental: Productividad de los recursos*. <https://www.ine.es>

- Instituto Nacional de Estadística [INE]. (2023). *Cuentas medioambientales: Cuenta de residuos. Año 2022*. https://www.ine.es/prensa/ca_2022.pdf
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- ISO. (2006a). *ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2006b). *ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2006c). *ISO 14025:2006 – Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2017). *ISO 21930:2017 – Sustainability in buildings and civil engineering works – Core rules for environmental product declarations of construction products and services*. International Organization for Standardization.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2015). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 324–330.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Lo-lacono-Ferreira, V. G., Rodríguez, E., & Hospido, A. (2016). From life cycle thinking to life cycle management: A case study in the construction sector. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1211–1222. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.056>
- Maccarrone, V., Bortolini, M., Galizia, F. G., Mora, C., & Gamberi, M. (2019). Environmental performance of elevator systems: A life cycle approach for residential buildings. *Sustainability*, 11(7), 1993. <https://doi.org/10.3390/su11071993>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2018). *Estrategia Española de Economía Circular. Borrador*. Gobierno de España.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *Guía práctica para la inclusión de criterios ambientales en la contratación pública*. Gobierno de España.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990–2022*. Gobierno de España. <https://www.miteco.gob.es>
- Mutel, C. L. (2017). Brightway: An open source framework for life cycle assessment. *Journal of Open Source Software*, 2(12), 236. <https://doi.org/10.21105/joss.00236>
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- Peña, C., Cordella, M., Alfieri, F., & Wolf, O. (2022). *Product Environmental Footprint Category Rules for Building Products (Draft 2.0)*. Publications Office of the European Union.

- PRé Sustainability. (2023). *SimaPro Software: Features & Applications*. <https://simapro.com>
- Psicología y Mente. (s.f.). *La paradoja de Jevons: qué es, por qué se da, y ejemplos*. <https://psicologiymente.com/social/paradoja-de-jevons> (Consultado en mayo de 2024)
- Sheng, Y., Yu, T., Lu, X., & Hu, S. (2020). Life cycle assessment of elevators considering technological development. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101956. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101956>
- Sphera. (2024). *GaBi Software Overview*. <https://sphera.com/gabi-lca-software/>
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435–438. <https://doi.org/10.1038/531435a>
- The International EPD System. (2023). *Environmental Product Declarations for lifts and escalators*. <https://environdec.com>
- TK Elevator. (2023). *Sustainability report 2023*. <https://www.tkelevator.com/global-en/sustainability/download-center/>
- TK Elevator. (2023a). *EOX – Product Configuration Guide*. <https://www.tkelevator.com/es-es/productos/ascensores/eox/>
- TK Elevator. (2023b). *EOX Technical Installation Guidelines*. Documentación técnica interna de TK Elevator Europe.
- TK Elevator. (2023c). *EOX Product Environmental Profile – Technical Sheet*. TK Elevator Europe.
- TK Elevator. (2023d). *MAX – Mantenimiento predictivo para ascensores*. <https://www.tkelevator.com/es-es/servicios/mantenimiento/max/>
- United Nations Environment Programme [UNEP]. (2020). *2020 Global Status Report for Buildings and Construction*. <https://globalabc.org>
- Vadenbo, C., Hellweg, S., & Astrup, T. (2014). Let's be clear(er) about substitution: A reporting framework to account for product displacement in life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 18(3), 324–338.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Zhao, Y., You, F., & Xu, C. C. (2019). Sustainability metrics for eco-industrial parks: Evaluation and optimization. *Environmental Science & Technology*, 53(11), 6628–6642. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01143>