



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN TRANSFORMADOR DE MEDIA TENSIÓN PARA LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Autor: Teresa Bas Andreu

Director: Carlos Martín Sastre

Madrid

Agosto 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“Desarrollo de una herramienta para el Análisis de Ciclo de Vida de un Transformador de Media Tensión para la red de distribución”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Teresa Bas Andreu

Fecha: 27/ 08/ 2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Carlos Martín Sastre

Fecha: 27/ 08/ 2023



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA
EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN
TRANSFORMADOR DE MEDIA TENSIÓN
PARA LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Autor: Teresa Bas Andreu

Director: Carlos Martín Sastre

Madrid

Agosto 2023

Agradecimientos

A mi tutor, Carlos, por transmitirme sus conocimientos y por su disponibilidad durante todo el proceso para resolver todas mis dudas. A mi familia y amigos, por su apoyo constante hasta el final.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN TRANSFORMADOR DE MEDIA TENSIÓN PARA LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Autor: Bas Andreu, Teresa.

Director: Martín Sastre, Carlos.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Se ha realizado un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de tres transformadores fabricados en 1980, 2022 y 2050, de acuerdo con el marco legislativo establecido en la Unión Europea (UE). La realización del ACV permite conocer cuáles son las etapas más significativas: fabricación y operación, así como las principales categorías de impacto: cambio climático, acidificación, uso de recursos - fósiles y uso de recursos - minerales y metales. A partir de este análisis, se desarrolla una herramienta simplificada sin comprometer los resultados del ACV y que permite integrar criterios ambientales en los procesos de compra. Se presenta un ejemplo de ACV realizado a través de la herramienta con tres transformadores de fabricantes diferentes para obtener una puntuación sobre su desempeño ambiental a integrar en el proceso de compra verde.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida (ACV), transformador, red de distribución, compra verde, sostenibilidad.

1. Introducción

El cambio climático es uno de los mayores retos que va a enfrentar la humanidad. Como consecuencia, se ha originado un movimiento social hacia el desarrollo sostenible apoyado por todo tipo de organizaciones. La sostenibilidad implica favorecer aquellos productos con menor impacto en el medio ambiente, pero para ello es necesario medir su desempeño ambiental. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es uno de los métodos de referencia para evaluar el impacto ambiental de un producto, ya que está basado en la ciencia e incluye un análisis completo del ciclo de vida del producto, desde la extracción de las materias primas necesarias hasta el fin de vida.

La UE ha desarrollado un potente marco legislativo para promover el desarrollo sostenible. Dentro de este se encuentran los diferentes estándares publicados para la realización de un ACV correcto. La normativa seguida en el presente trabajo son las descritas que garantizan una comparación transparente y fiable de productos en Europa:

- *“ISO 14040:2006 (en) Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework”* [2] and *“ISO 14044:2006 (en) Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guideline”* [3].
- *“Product Environmental Footprint (PEF) Guide”* [4].
- *“PCR - rev. 3 - EN - 2021 01 13 for Electronic and electrical products and systems”* [5].
- *“Sub PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers”* [6].

Algunos de los estándares utilizados son específicos para el producto analizado: el transformador. Los objetivos de la transición energética implican una electrificación de la economía, para lo que es necesario el desarrollo de la red de distribución. El transformador es una pieza clave en la red y, por

tanto, la evaluación de su impacto ambiental es esencial para el desarrollo sostenible del sector energético.

2. Definición del objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto consiste en la elaboración de una herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) simplificada para su integración en los procesos de compra, promoviendo aquellos equipos con mejor desempeño ambiental.

Para alcanzar este objetivo principal, el proyecto se divide en los siguientes objetivos específicos:

1. Modelado de un ACV de un transformador estándar actual.
2. Evaluación del ACV de transformadores del pasado, presente y futuro a fin de identificar los impactos y las etapas más relevantes.
3. Desarrollo de una herramienta simplificada basada en el modelo de ACV que permita comparar de manera sencilla el impacto ambiental para un proceso de compra.

La compra verde consiste en seleccionar aquellos equipos con menor impacto ambiental. Se trata de una práctica positiva que ofrece a las compañías la oportunidad de generar un impacto positivo a la vez que se adquiere un mayor conocimiento del producto.

3. Descripción del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El objetivo del proyecto es cuantificar el impacto ambiental del transformador para alcanzar el conocimiento necesario e integrar los resultados como criterios ambientales en los procesos de compra. Por tanto, el público objetivo no es externo y no se pretenden publicar los resultados al exterior, sino generar una herramienta interna para compra verde de transformadores.

La unidad funcional considerada es un transformador de 630kVA con un voltaje primario de 20kW y un voltaje secundario de baja tensión (BT). La vida útil del transformador considerada son 35 años. Además, se han analizado dos posibles escenarios de funcionamiento para la fase de operación en función del índice de carga que estará al 40% y al 70%. La "Sub PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers" [6] indica que el índice de carga a considerar debería ser del 70%. Sin embargo, la infraestructura eléctrica suele estar sobredimensionada para garantizar la seguridad del suministro. Por tanto, los transformadores de la red de distribución a menudo operan a índices de carga más bajos, por este motivo, se ha considerado interesante también realizar el análisis para un índice de carga del 40%.

El ACV se realiza considerando que el transformador se fabrica, se instala y se opera en España. Por tanto, las pérdidas de energía durante la operación están directamente relacionadas con el impacto del mix de generación considerado para cada ACV.

La modelización se realizó con el software SimaPro, versión 9.3.0.3. [7]. El inventario del ciclo de vida se realizó utilizando la base de datos Ecoinvent 3.8 [8] que es reconocida a nivel europeo por su considerable tamaño y calidad. Se seleccionó Ecoinvent porque está incluida en SimaPro y

contiene los factores de caracterización para la ubicación del estudio y las diversas tecnologías consideradas.

El alcance considerado recoge el ciclo de vida completo del producto desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida, siguiendo un enfoque de la cuna a la tumba. Las diferentes etapas se categorizan en los siguientes módulos especificados por la “*Sub PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [6]:

Upstream (aguas arriba): Se incluye la extracción y procesamiento de materias primas, el consumo de energía durante la fabricación y la distribución de los subcomponentes hasta la fábrica de ensamblaje del transformador. Las materias primas consideradas para el transformador incluyen material ferromagnético, acero, cobre, aluminio, papel aislante, aceite, resina. También se consideran los procesos de trabajo del acero y el aluminio en este módulo.

Core (núcleo): Se incluye el proceso de ensamblaje del transformador, el consumo de energía, el transporte y la gestión de residuos en la fábrica.

Downstream (aguas abajo): Se incluye las etapas de distribución, operación y fin de vida.

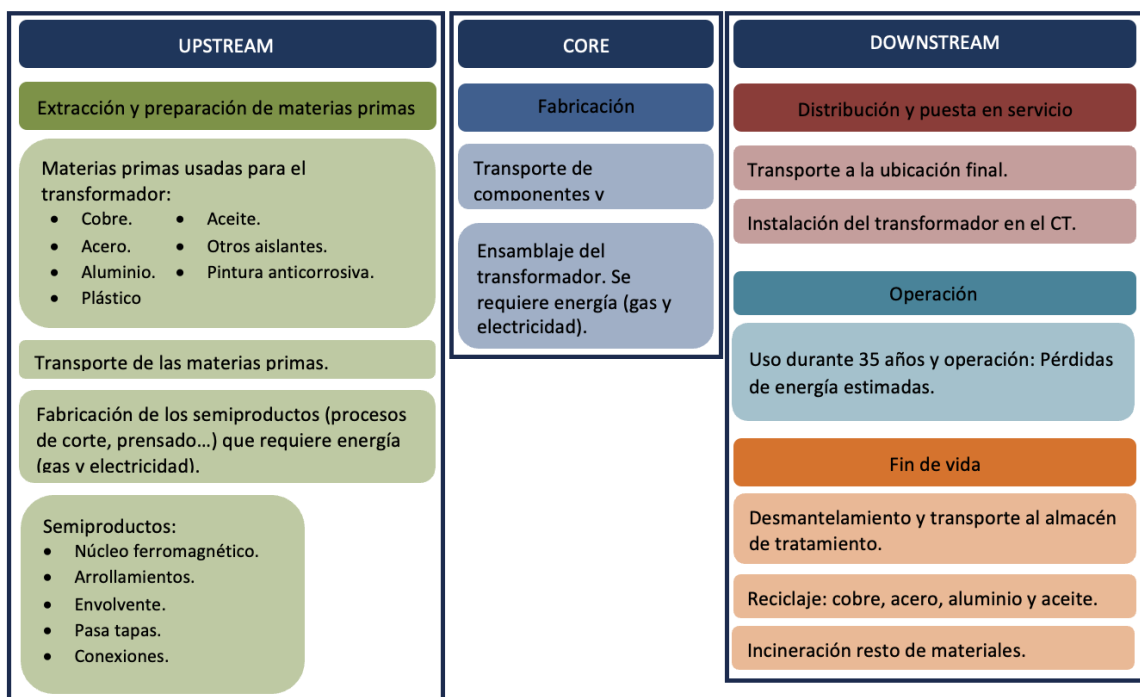


Figura 1: Esquema del ACV del transformador.

Durante el análisis de los resultados se normalizan y ponderan las categorías de impacto obtenidas. La metodología utilizada se basa en la norma EN 15804 + A2:2019 [9], que se alinea con el método EF 3.0 [4]. Los valores de normalización utilizados corresponden con los publicados en noviembre de 2019. Cabe destacar que SimaPro ha adaptado los valores para que se ajusten mejor a las sustancias utilizadas en su base de datos [10]. Respecto a los factores de ponderación, son especialmente relevantes para definir el desempeño ambiental y garantizar la comparabilidad entre diferentes productos. En el artículo “*Development of a weighting approach for the Environmental*

Footprint” [11], el JRC ha analizado a través de diferentes métodos cuáles son los factores de ponderación más adecuados y ha propuesto dos conjuntos de valores, unos teniendo en cuenta los impactos relacionados con la toxicidad y otros excluyendo estos impactos. SimaPro utiliza valores de ponderación que incluyen las categorías de impacto relacionadas con la toxicidad. Sin embargo, en este proyecto los valores de ponderación utilizados excluyen las categorías de impacto relacionadas con la toxicidad ya que según la Sub-PCR estas categorías de impacto no son relevantes para el ACV del transformador. Además, en el documento el JRC indica que la solidez de estas categorías de impacto es baja, por lo que puede ser aconsejable excluirlas al estudiar el desempeño ambiental. Los factores de ponderación utilizados son los siguientes:

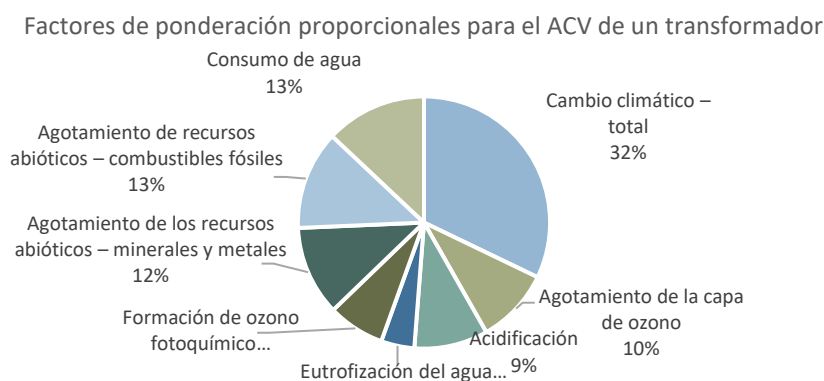


Figura 2: Factores de ponderación proporcionales para el ACV del transformador con el método EF 3.0.

3.1. Análisis del inventario

Upstream y core:

Los datos utilizados se han obtenido a partir de mediciones realizadas por los fabricantes durante el año 2021. Obtener el consumo de materias primas en la fabricación de transformadores de las décadas de 1970 y 1980 ha sido un desafío, por lo que se han extraído los valores de las principales materias primas de las fichas técnicas y se ha considerado una distribución similar a la de los transformadores actuales para el resto.

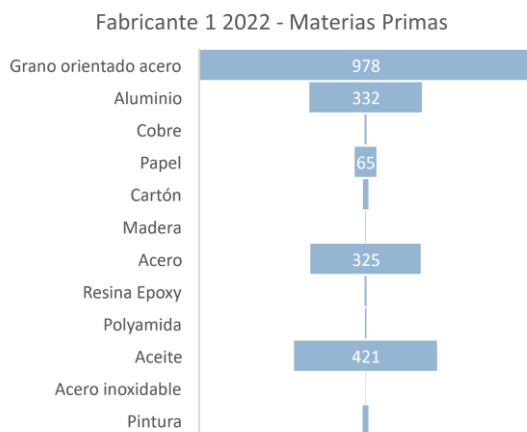


Figura 3: Materias primas (kg) del fabricante 1 para el transformador de 2022.

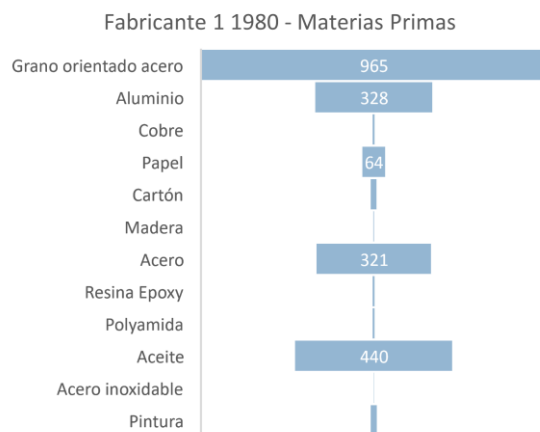


Figura 4: Materias primas (kg) del fabricante 1 para el transformador de 1980.

Respecto al transformador de 2050, se ha supuesto una distribución igual de las materias primas que el transformador base en 2022, aunque considerando que el 50% de estos materiales son reciclados, el 20% reutilizados y el 30% materias primas extraídas. Sin embargo, los factores de caracterización para materiales reciclados disponibles en SimaPro para las metodologías utilizadas son limitados. Por esta razón, esta suposición se ha utilizado solo para los materiales de acero, aluminio, cobre, papel, cartón y madera. Para el resto de los materiales, se ha considerado que el 80% proviene de materias primas extraídas de la naturaleza y el 20% proviene de materiales reutilizados de transformadores cuya vida útil ha terminado. Para los materiales reutilizados, se ha considerado que requieren una distancia adicional de transporte de 100 km y no tienen ningún impacto asociado con las materias primas, ya que su impacto ya ha sido contabilizado. El impacto ambiental asociado a este transporte se ha calculado con camiones de Ecoinvent 3.8, EURO 5.

Downstream:

Definir la fase de distribución para un caso general es complejo ya que el público objetivo de este estudio son los distribuidores, por tanto, la distribución del transformador depende de su ubicación final que puede variar según la posición en la red donde se instale. Por esta razón, se ha considerado una distancia promedio de 400 km por tierra. El impacto ambiental asociado con este transporte se ha calculado utilizando camiones de la base de datos Ecoinvent 3.8, EURO 5.

En la fase de operación se incluyen los impactos asociados a la energía consumida por el transformador durante su vida útil. Esta energía consumida incluye, además de cualquier consumo asociado posible, las diferentes pérdidas que tienen lugar durante el proceso de transformación de la tensión. Los transformadores utilizados para este estudio no tienen consumo auxiliar para enfriamiento o digitalización, por lo que, el consumo de energía corresponde únicamente a las pérdidas energéticas.

La “*Sub PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [6] define cómo deben calcularse las pérdidas energéticas, siguiendo la norma técnica IEC 60076-1, que distingue dos tipos de pérdidas: pérdidas de carga y pérdidas sin carga. Se ha calculado la energía total perdida para dos escenarios diferentes en función del índice de carga: 40% y 70%. Se han considerado los valores estándar para las pérdidas de energía de los transformadores fabricados entre 1980 y 2022. Mientras que para el transformador de 2050 se ha estimado que las pérdidas energéticas mejoraran un 10% respecto al valor de los transformadores actuales (2022).

Para el fin de vida del transformador se considera que el transformador recorre una distancia de 100 km hasta la planta de gestión de residuos. En cuanto a los materiales, se han considerado tres posibles tratamientos de residuos: reciclaje, incineración y vertido. La información sobre el porcentaje de cada material sometido a cada proceso para los transformadores en el año 2022 se ha obtenido del INE (Instituto Nacional de Estadística). No había datos disponibles sobre la gestión de residuos del año 1980; por tanto, se ha utilizado la última información disponible del INE que corresponde al año 2002 [12]. Por último, para el transformador del año 2050, se ha asumido que todos los materiales serán reciclados.

3.2. Herramienta simplificada para el ACV de un transformador

La herramienta se ha elaborado teniendo en cuenta lo descrito en el artículo "*Integrating sustainability in asset management decision making: A case study on streamlined life cycle assessment in asset procurement*" [13] donde se analiza como simplificar el ACV para utilizar los resultados en los procesos de compra verde. Para ello, se centran en los flujos más relevantes de materiales y energía del inventario del ciclo de vida y en las categorías de impacto más significativas. La realización de estas simplificaciones permite utilizar el ACV como método de análisis, sin altas necesidades de conocimiento y tiempo y sin comprometer su validez. La herramienta se estructura en tres partes, en función de la fase del ACV:

- **Entrada de datos:** se presenta un resumen del ACV que sirve de explicación de la herramienta para facilitar la tarea de introducción de los datos necesarios por parte de los fabricantes. Si un fabricante no posee algún punto se utilizará el dato del modelo base con una penalización del 15%.
- **Factores de caracterización:** se han extraído de SimaPro los factores de caracterización para cada una de las actividades que se producen en las etapas del ciclo de vida del transformador, para posteriormente calcular los impactos.
- **Resumen de resultados:** se presenta el impacto ambiental para cada una de las categorías de impacto definidas en diferentes gráficos. Además, se muestra una tabla resumen de los resultados normalizados y ponderados que permite contrastar entre las diferentes categorías de impacto y conocer cuáles son más relevantes.

4. Resultados del ACV del transformador

A partir del análisis de inventario, en el que se modelan los procesos asociados al ciclo de vida, se obtienen los resultados de cada una de las categorías de impacto seleccionadas. Se ha analizado tanto la caracterización de los resultados, como los impactos ponderados y normalizados con el método descrito en el apartado anterior, para comparar los impactos entre sí e identificar los más relevantes. Se representan los valores absolutos de los impactos más significativos que son: cambio climático – total, acidificación y agotamiento de recursos – minerales y metales.

La categoría de impacto de cambio climático ha decrecido considerablemente a lo largo de los años gracias a las acciones de reducción de la etapa de operación, mediante la transición hacia mixes energéticos más sostenibles y la disminución de las pérdidas del transformador.

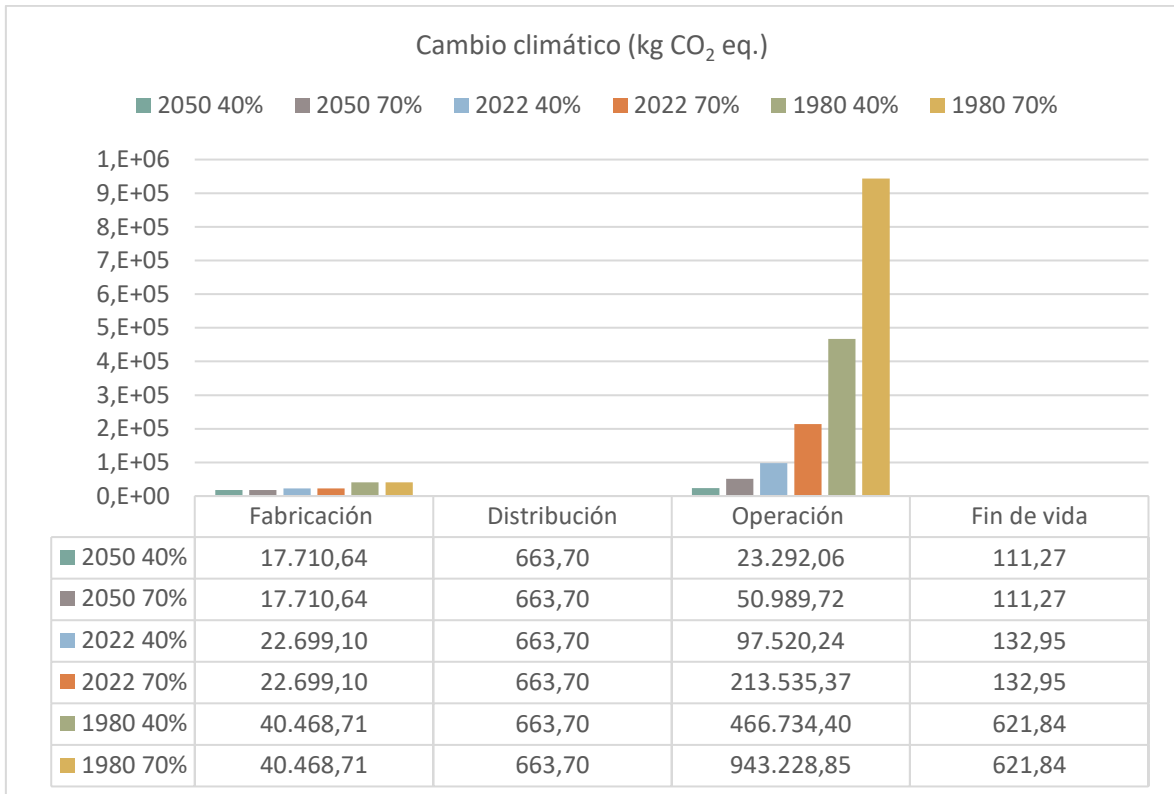


Figura 5: Caracterización del impacto de cambio climático (kg CO₂ eq.) del ACV del transformador.

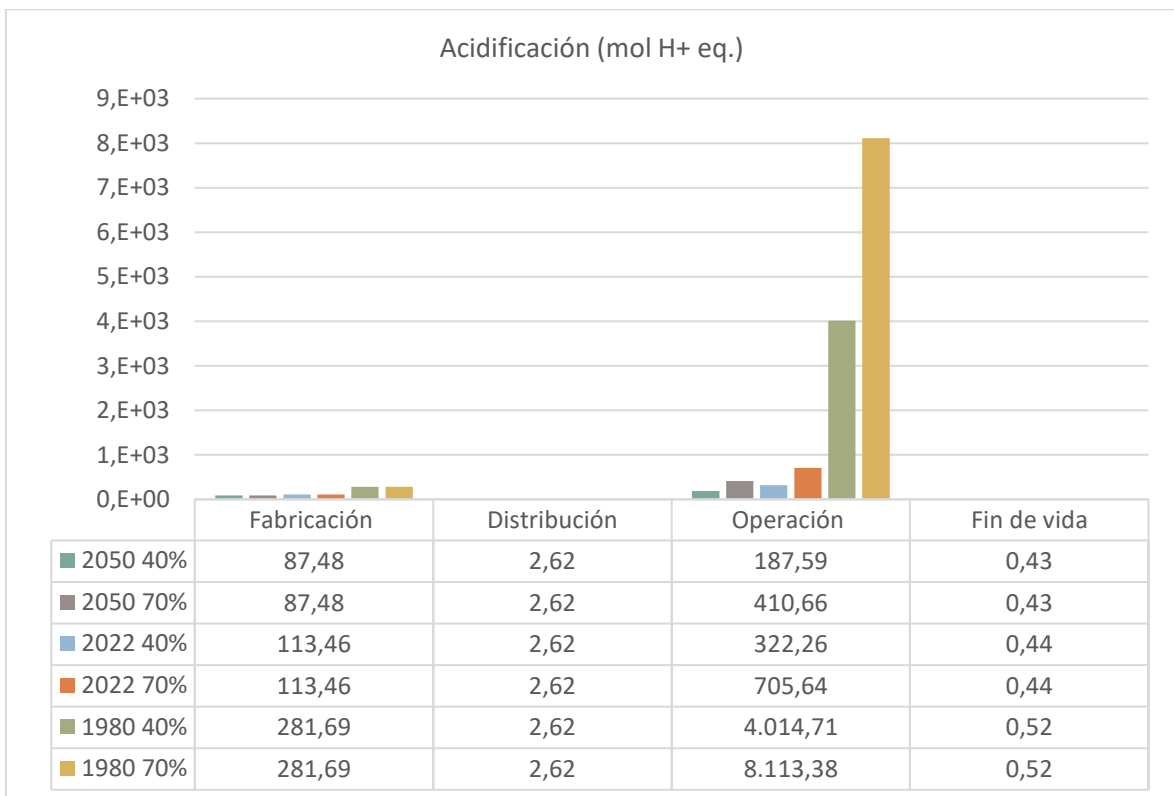


Figura 6: Caracterización del impacto de acidificación (mol H⁺ eq.) del ACV del transformador.

Respecto a la categoría de acidificación, se observa una reducción significativa, especialmente en la fase de operación. El elevado valor de la caracterización de la acidificación en esta etapa se debe al uso de tecnologías de generación basadas en recursos energéticos con carbón que liberan cantidades significativas de gases y partículas contaminantes como los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno. La reducción de este tipo de tecnologías y la mejora de los métodos de captura y reducción de emisiones, han permitido disminuir de manera significativa este impacto.

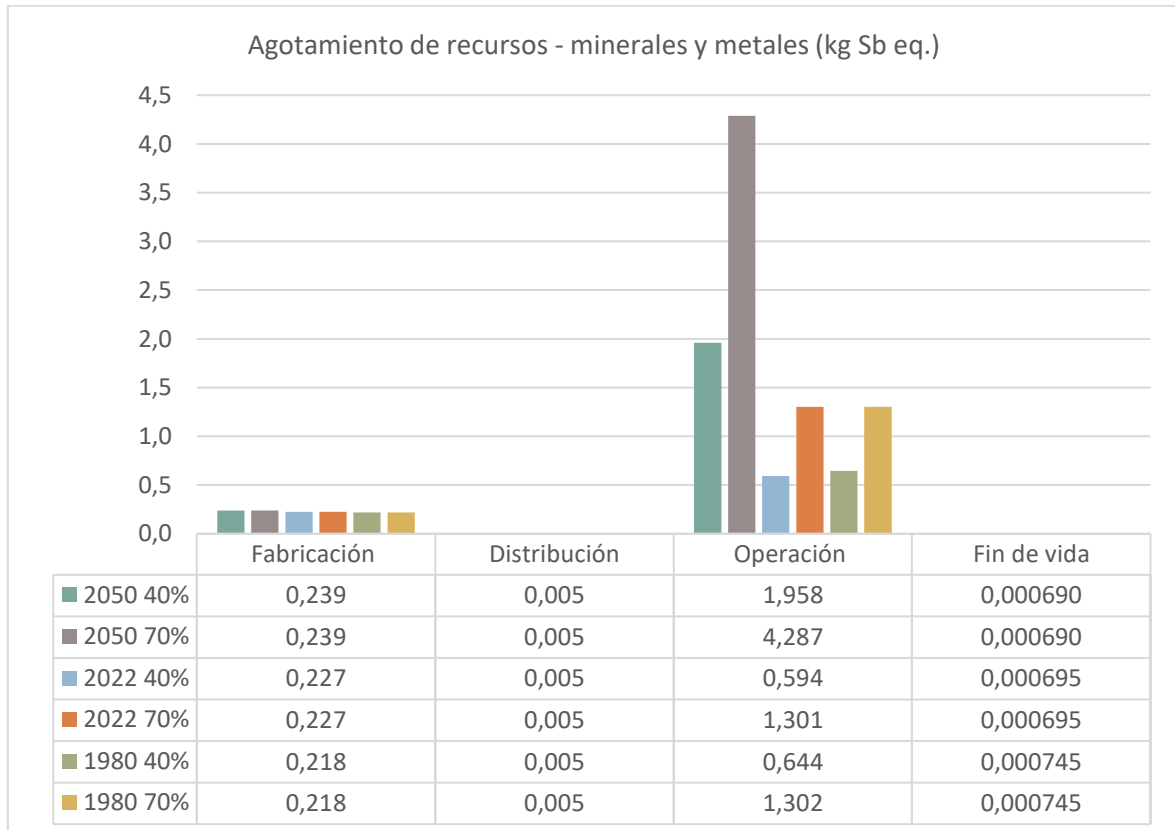


Figura 7: Caracterización del agotamiento de recursos – minerales y metales (kg Sb eq.) del ACV del transformador.

En cuanto al impacto de agotamiento de recursos – minerales y metales, se observa un aumento al comparar la operación del transformador de 2050 con el de 1980. Este aumento se debe a la evolución del mix de generación hacia tecnologías basadas en la electrónica que requieren de este tipo de recursos para su fabricación. El mix de generación utilizado para el transformador de 2050 tiene una alta presencia de energía generada con solar fotovoltaica, cuyo impacto ambiental en la categoría de agotamiento de recursos – minerales y metales es elevado.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras la ponderación y normalización de las categorías de impacto para las cuatro fases de estudio de los ACV de los tres transformadores estudiados con la herramienta simplificada elaborada.

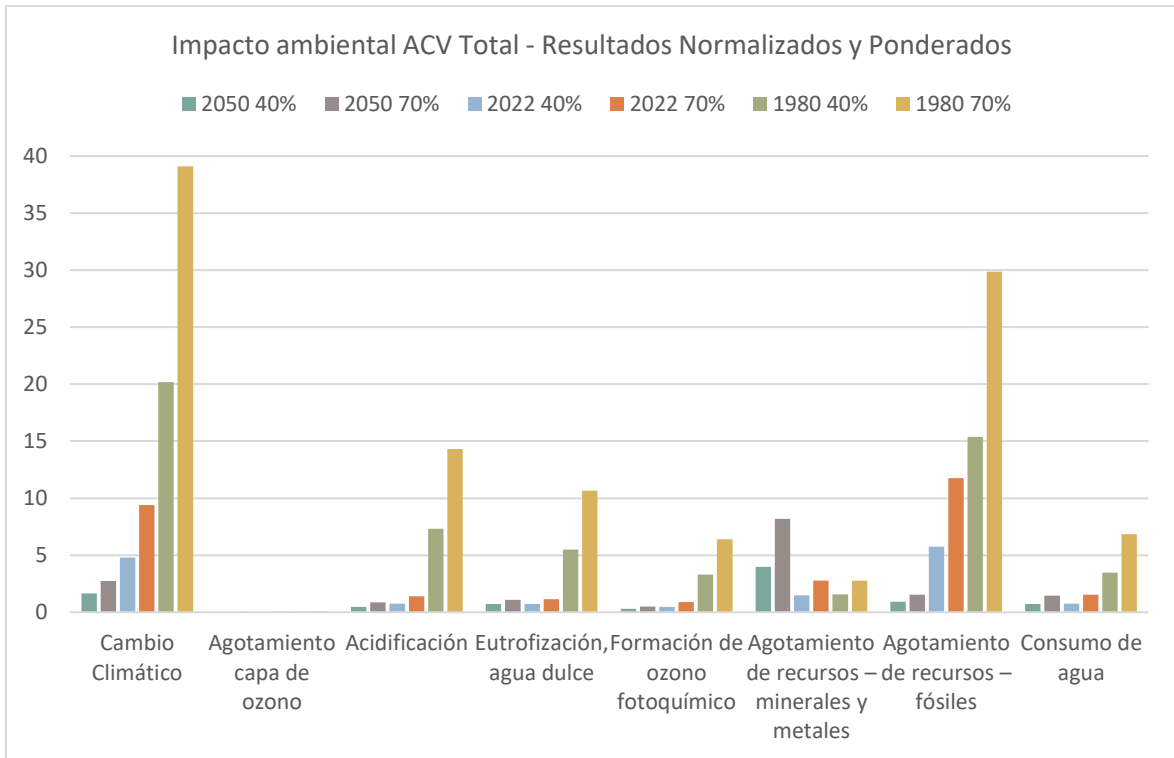


Figura 8: Resultados normalizados y ponderados siguiendo el método EF 3.0. del Total del ACV del transformador.

A través de esta gráfica, se puede apreciar cuales son las categorías de impacto más relevantes que son el cambio climático, el uso de recursos tanto fósiles como minerales y metales y la acidificación. También se observa como en general el impacto total del transformador se ha reducido en el tiempo.

Se realiza también el ACV a través de la herramienta realizada de tres transformadores de 2022, para los que se obtienen los resultados caracterizados y normalizados y ponderados siguiendo el método EF 3.0. A partir de estos resultados se obtiene una puntuación sobre el desempeño ambiental de cada uno. Esta nota podrá ser considerada en los procesos de compra verde de los transformadores.

Tabla 1: Puntuación única del desempeño ambiental de cada transformador.

Fabricante	Puntuación única
Fabricante 1	28,43
Fabricante 2	36,05
Fabricante 3	25,85

Se representa en una gráfica los valores totales del ACV de cada transformador. A través de la gráfica se puede observar cómo los impactos principales son los relacionados con el cambio climático, tras los que están el agotamiento de recursos – minerales y metales y la acidificación.

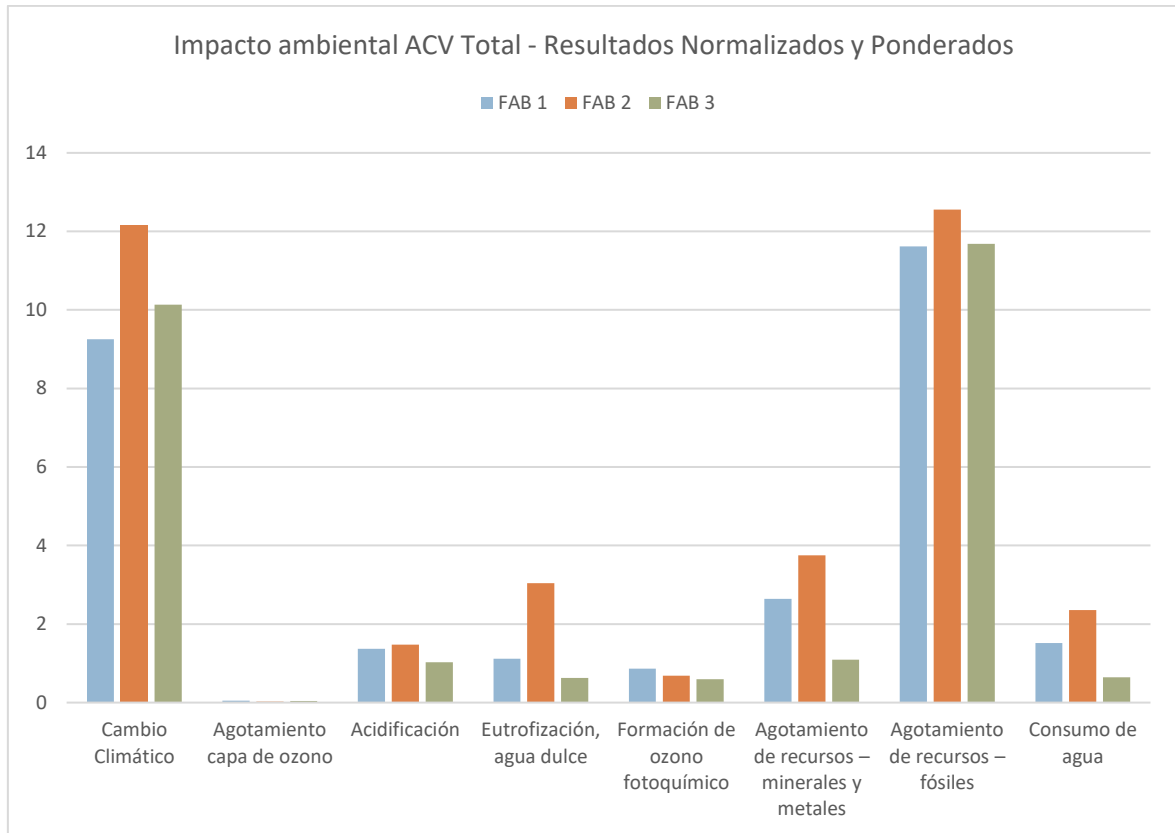


Figura 9: Puntuación única del impacto ambiental total de los transformadores de los fabricantes 1, 2 y 3 normalizados y ponderados siguiendo el método EF 3.0.

5. Conclusiones

El objetivo del proyecto consiste en la realización de una herramienta sencilla para el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de transformadores de media tensión en redes de distribución que permita evaluar su impacto ambiental para su integración en procesos de compra verde. Para ello, se ha realizado un ACV de transformadores de 1980, 2022 y 2050 mediante los cuales se obtenga información valiosa para su elaboración. A través de estos ACV se ha identificado que la etapa de operación es la de mayor impacto ambiental (86,22% - puntuación única tras normalizar y ponderar los resultados), debido a la larga vida útil de los transformadores. Los transformadores actuales han reducido considerablemente sus pérdidas energéticas con respecto a los de 1980, por esto motivo, reducir el impacto de esta etapa es un importante desafío para los fabricantes.

En consecuencia, se ha identificado que la etapa de fabricación, que representa el 13,4% (puntuación única tras normalizar y ponderar los resultados) del impacto total, es la de mayor potencial de reducción. Al comparar el comportamiento del transformador del 2022 y 2050, se observa una reducción de la mayoría de los impactos, como consecuencia de la utilización de materiales reciclados y reutilizados. Por ello, acciones que promuevan la economía circular y el ecodiseño podrían generar un impacto positivo.

A través de los resultados obtenidos se elabora la herramienta, utilizando únicamente aquellos flujos más relevantes. El diseño de la herramienta se realiza de forma que sea sencilla su utilización.

Tras esto, se lleva a cabo un ejercicio de comparación de tres transformadores procedentes de tres fabricantes diferentes del 2022 a los que se les establece una puntuación en función de su desempeño ambiental. La realización de este ejercicio ha sido simple y ha permitido desarrollar criterios medioambientales para su integración en los procesos de compra.

En resumen, la realización de un ACV de una pieza clave del sector energético como es el transformador es esencial para asegurar un desarrollo sostenible. Conocer el desempeño ambiental del ciclo completo del transformador permite tomar decisiones teniendo en cuenta el medio ambiente.

6. Referencias

- [1] MATELEC s.a.l. (2022). *Environmental product declaration - 630 kVA distribution transformer-FES0300030 (111128)*. EPD Italy.
- [2] International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040:2006 gestión ambiental — análisis del ciclo de vida — principios y marco de referencia*.
- [3] International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14044:2006 gestión ambiental — análisis del ciclo de vida — requisitos y directrices*.
- [4] Manfredi, S., Allacker, K., Pelletier, N., Chomkhamsri, K., & de Souza, D. M. (2012). *Product environmental footprint (PEF) guide*. European Commission-Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability H08 Sustainability Assessment Unit.
- [5] PCR electronic and electrical products and systems, (2023).
- [6] EPDItaly Regulations. (2021). Sub-category PCR electronic and electrical products and systems – power transformers.
- [7] SimaPro. (2023). *LCA software for informed changemakers*. <https://simapro.com/>
- [8] Ecoinvent. (2023). *Ecoinvent Database*. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- [9] EN 15804:2012+A2:2019 sostenibilidad en la construcción. declaraciones ambientales de producto. reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción. (2019).
- [10] Database & Support team at PRé Sustainability. (2022). SimaPro database manual - methods library. *SimaPro*, <https://simapro.com/wp-content/uploads/2022/07/DatabaseManualMethods.pdf>
- [11] Sala, S., Cerutti, A. K., & Pant, R. (2018). Development of a weighting approach for the environmental footprint. *Publications Office of the European Union*, (EUR 28562 EN)<https://10.2760/446145>
- [12] Instituto Nacional de Estadística, (. (2023). *Estadística sobre recogida y tratamiento de residuos*. <https://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?tpx=33000&L=0>
- [13] Haanstra, W., Gelpke, R., Braaksma, A. J. J., Karakoc, I., & Den Hartog, C. (2019). *Paper 835 - integrating sustainability in asset management decision making: A case study on streamlined life cycle assessment in asset procurement*. 25th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution.

DEVELOPMENT OF A TOOL FOR THE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A MEDIUM VOLTAGE TRANSFORMER FOR THE DISTRIBUTION GRID.

Author: Bas Andreu, Teresa.

Supervisor: Martín Sastre, Carlos.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

A Life Cycle Analysis (LCA) has been conducted on three transformers manufactured in 1980, 2022, and 2050, following the established legislative framework of the European Union (EU). The performed LCA reveals the most significant stages: manufacturing and operation, as well as the major impact categories: climate change, acidification, resource use - fossil, and resource use - minerals and metals. Based on the different LCA conducted, this project develops a simplify tool to integrate environmental criteria in purchasing processes promoting the consideration of environmental factors when making purchasing decisions and thereby fostering more sustainable practices. An example of an LCA conducted through this tool is presented, evaluating the environmental performance of three transformers from different manufacturers, with the aim of incorporating it into the green procurement process.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), transformer, distribution network, green procurement, sustainability.

1. Introduction

Humanity is facing one of its greatest challenges of the history: climate change. Sustainable development stands as the objective that society has embrace to solve the environmental problems. It enforces the products that have less environmental impact. The Life Cycle Assessment (LCA) is the referent method to analyse the environmental performance of a product, as it is a science-based method which requires the study of all the life cycle of a product from the extraction of raw materials to its end of life.

The EU has established a regulatory framework to promote sustainable development. As part of it, they have published different standards and guides to develop and adequate LCA. The standards followed for this project are the was shown below, which facilitates transparent and reliable LCA comparisons of EU products.

- “ISO 14040:2006 (en) Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework” [2] and “ISO 14044:2006 (en) Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guideline” [3].
- “Product Environmental Footprint (PEF) Guide” [4].
- “PCR - rev. 3 - EN - 2021 01 13 for Electronic and electrical products and systems” [5].
- “Sub PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers” [6].

Some of the standards are specific for the product studied: a transformer. The energy transition objectives require an electrification of the economy which involves a development of the grid. Transformers play a key role in the electrical infrastructure; this is why the analysis of their environmental performance is essential to ensure a sustainable development of the energy sector.

2. Project Objective Definition

The objective of this project is the development a simplified Life Cycle Assessment (LCA) tool that facilitates the study of the environmental impact of a medium-voltage transformer to integrate green procurement criteria.

The project is divided into the following specific objectives:

- a) Modelling the LCA of a 2022 standard transformer.
- b) Evaluating the LCA of transformers from the past (1980), present (2022), and future (2050), with the aim of understanding the most relevant environmental impacts and stages of the life cycle.
- c) Developing a simplified tool based on the previous LCA models, which allows for an easy comparison of the environmental impact of transformers from different manufacturers.

Integrating environmental criteria into procurement processes involves selecting products with a lower environmental impact, offering opportunities for companies to make positive contributions to reducing their environmental impacts and improving product functionality.

3. Description of the Life Cycle Assessment (LCA)

The objective of this work is to quantify the environmental impact of the transformer. The application of this LCA will be for integrating the results as environmental criteria for the procurement process. Therefore, the objective of the study is not to publish the results externally but to generate an internal tool that allows the comparison between different transformers.

The functional unit considered for the LCA is a 630kVA transformer with a primary voltage of 20kV and a secondary low voltage (LV). The transformer is assumed to have a 35-year lifespan. The LCA considers two possible operating scenarios during the operation phase: 40% and 70% load index. The "*Sub PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*" [6] defines that the load index to be considered corresponds to 70% of the nominal power. However, usually to ensure supply safety and avoid potential risks, electrical infrastructure is oversized. Therefore, distribution network transformers often operate at lower load indexes. This is the reason why in this study also is compared the environmental impact of the transformer operating at 40%.

Regarding the location, the transformer is assumed to be manufactured, installed, and operated in Spain. Therefore, the energy losses during operation will be associated with Spain's energy mix based on the year of the LCA study.

The modelling was performed using the software of SimaPro, version 9.3.0.3. [7]. The life cycle inventory was conducted using the Ecoinvent 3.8 database [8], which is widely recognized at the European level for its considerable size and quality. Ecoinvent was chosen because is the one included in SimaPro and it contains the characterization factors for the study location and the various technologies considered.

The scope of the LCA considers the product's life cycle from raw material extraction to end of life, following a cradle-to-grave approach. The different stages are categorized into the following modules specified by the “*Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [6]:

Upstream: This module includes raw material extraction and processing, energy consumption during manufacturing and distribution from suppliers to the transformer assembly factory. The raw materials considered for the transformer include ferromagnetic material, aluminum, insulation paper, glass fabric, steel, mineral or vegetal oil and resin. The steel and aluminum working processes are also considered in this module.

Core: This module includes the transformer's assembly process, including the energy consumed, transportation, and waste management at the factory.

Downstream: This module covers the stages of distribution, operation, and end-of-life.

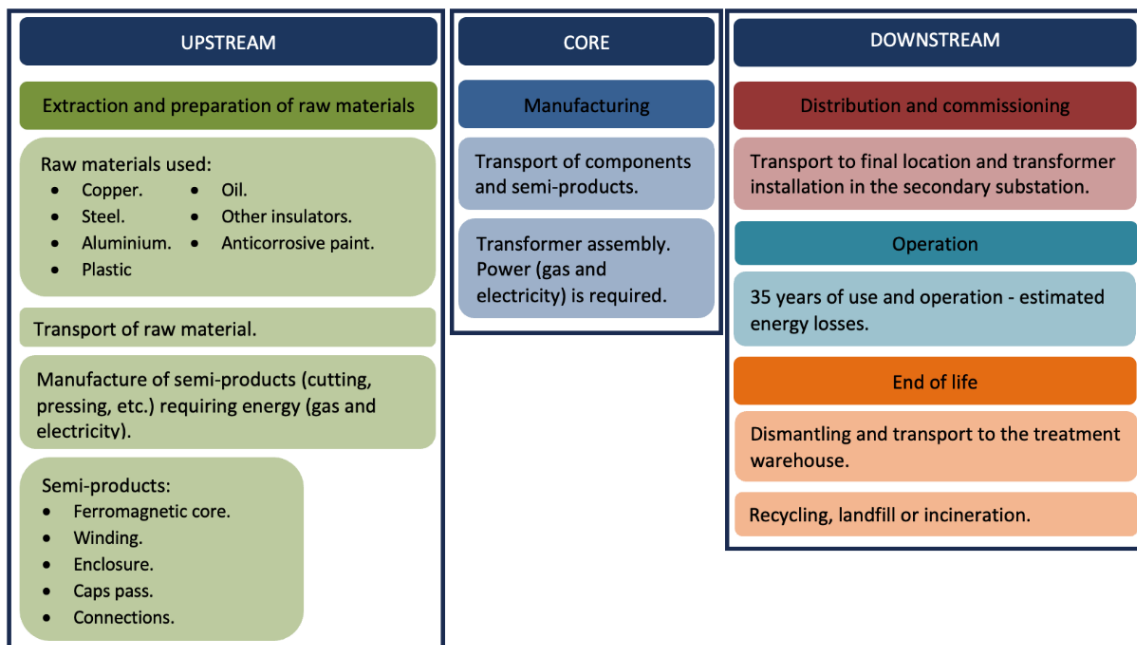


Figure 1: Transformer LCA scheme.

The methodology used for normalization and weighted values used is based on the EN 15804 + A2:2019 [9] standard that is align with the EF 3.0 method [4]. The normalization values from the EF 3.0 method published in November 2019 were used. It should be noted that the implementation of this method in SimaPro has been adapted to better fit the substances used in SimaPro data libraries. The development of weighting factors is essential for establishing an environmental performance value and ensuring reliable and comparable environmental information. In the “*Development of a weighting approach for the Environmental Footprint*” [11] the JRC has analyse through different methods the most suitable weighting factors proposed two weighting values, considering impacts related to toxicity and excluding these impacts. SimaPro uses weighting values that include toxicity-related impact categories. However, in this present study, the weighting values used exclude toxicity-related impact categories. According to the JRC document, the robustness of these impacts

categories is low, and therefore, excluding them may be advisable when studying environmental performance. The weighting values used are the following:

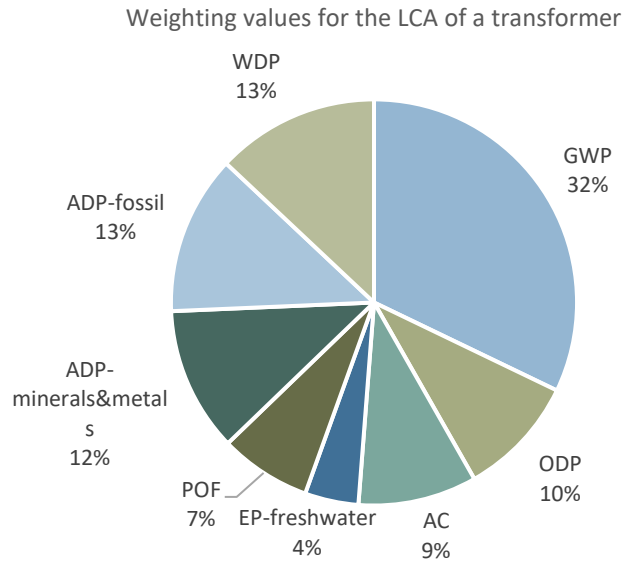


Figure 2: Weighting values for the transformer LCA with the EF 3.0 method.

3.1. Inventory analysis

Upstream and core:

The data used for this process has been obtained from measurements of manufacturers during the year 2021. Obtaining the raw material consumption in the manufacturing for the LCA of transformers from the 1970s-1980s has been a challenge, hence factsheets indicating the main raw materials and total weight have been considered and a similar distribution to that of current transformers has been considered for the remaining unspecified raw materials such as resin, stainless steel, or paint.

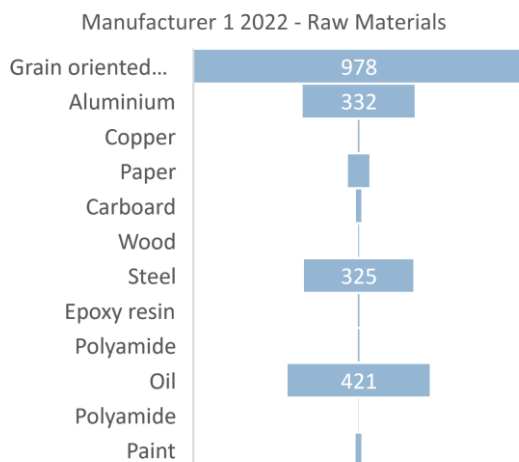


Figure 3: Raw materials (kg) for manufacturer 1 transformer 2022.

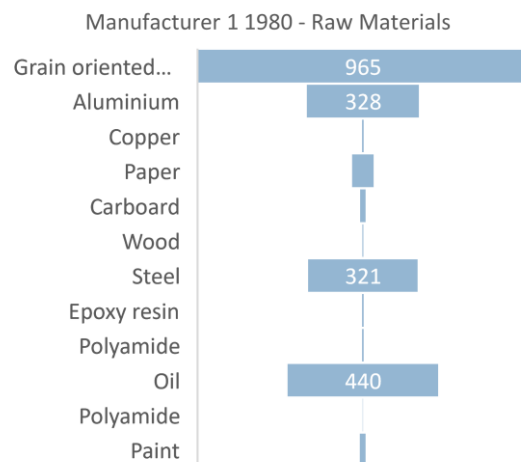


Figure 4: Raw materials (kg) for manufacturer 1 transformer 1980.

Moreover, an equal distribution of raw materials has been assumed for the 2050 transformers as for the base transformer in 2022, considering that 50% of these materials are recycled, 20% reused and 30% extracted raw materials. Nevertheless, the characterization factors for recycled materials available in SimaPro for the employed methodologies are limited. For this reason, this assumption has been used only for steel, aluminum, copper, paper, cardboard, and wood materials. For the rest of the materials, it has been considered that 80% comes from raw materials extracted from nature, and 20% comes from reused materials from transformers whose useful life has ended. For reused materials, it has been considered that they require an additional transport distance of 100 km and do not have any impact associated with raw materials since their impact is already accounted. The environmental impact associated with this transport has been calculated using trucks from Ecoinvent 3.8 database EURO 5.

Downstream:

The distribution phase is complex as the target audience of this study is the distributors. Therefore, after the transformer is manufactured, the transport distance to its final location may vary depending on the position in the grid where it will be installed. For this reason, an average distance of 400km overland has been considered. Also, this was the distance used in the development of other tools. The environmental impact associated with this transport has been calculated using trucks from the Ecoinvent 3.8 database, EURO 5.

The operation stage includes the impacts related to the energy consumed by the transformer during its defined service life. This energy consumed includes, in addition to any possible associated consumption, the different losses that occur during the electricity transformation. The transformers used for this study do not have auxiliary consumption for cooling or digitization. Therefore, the energy consumption associated with this stage corresponds only to the energy losses.

The “*Sub PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [6] defines how these losses should be calculated following the technical standard IEC 60076-1, which distinguishes two types of losses: load losses and no-load losses. The total energy lost was calculated for two different scenarios: a 40% and 70% load index.

The energy losses for the transformers manufactured between 1980 and 2022 is the standard. But for the transformers in 2050, it is not possible to know the load and no-load losses. Therefore, a 10% improvement for energy losses has been considered compared to the current losses of the transformers.

The end of life of the transformer is divided in the waste treatment processes of the dismantling of the transformer and the transport distance to the facility. It is considered that the transformer is transported to the waste management plant over a 100 km distance. Regarding the materials, three possible waste treatments have been considered: recycling, incineration, and landfill. Information on the percentage of each material subjected to each process for transformers in the year 2022 has been obtained from the INE (National Statistics Institute). No waste management data was found for the year 1980; therefore, the latest available data from the INE which was year 2002, has been used. Lastly, for the transformer in the year 2050, considering the increase in raw material costs, it is assumed that all materials will be recycled.

3.2. Simplified tool for the LCA of the transformer

To integrate green procurement criteria, a simplified tool has been developed to improve time efficiency in the LCA calculation by focusing on the most relevant aspects. The tool consists of three parts:

- **Data Input:** All necessary data is entered, focusing on a user-friendly layout that will ensure autonomous use by manufacturers. The tool is divided into the different stages of the transformer's life cycle.
- **Characterization Factors:** Characterization factors for each stage have been extracted from SimaPro according to the scope and objective defined previously.
- **Summary of Results:** Environmental impact is presented for each impact category through various graphs. Additionally, a summary table of normalized and weighted results is provided for comparison across impact categories and to identify the most significant ones.

4. Results of the transformer LCA

From the inventory analysis, where the processes associated with the life cycle are modeled, the results for each of the selected impact categories are obtained. The characterization impacts are analyzed and then normalized and weighted with the method described in the previous section. This second representation of the results allows for a comparison of the impacts with each other to identify the most significant ones.

The absolute values of the most relevant impacts are represented, which include total climate change, acidification, and resource use - minerals and metals. A brief analysis of each of these impacts is also conducted.

The climate change impact category has significantly decreased over the years thanks to reduction actions in the operational phase, such as transitioning to more sustainable energy mixes and decreasing transformer energy losses.

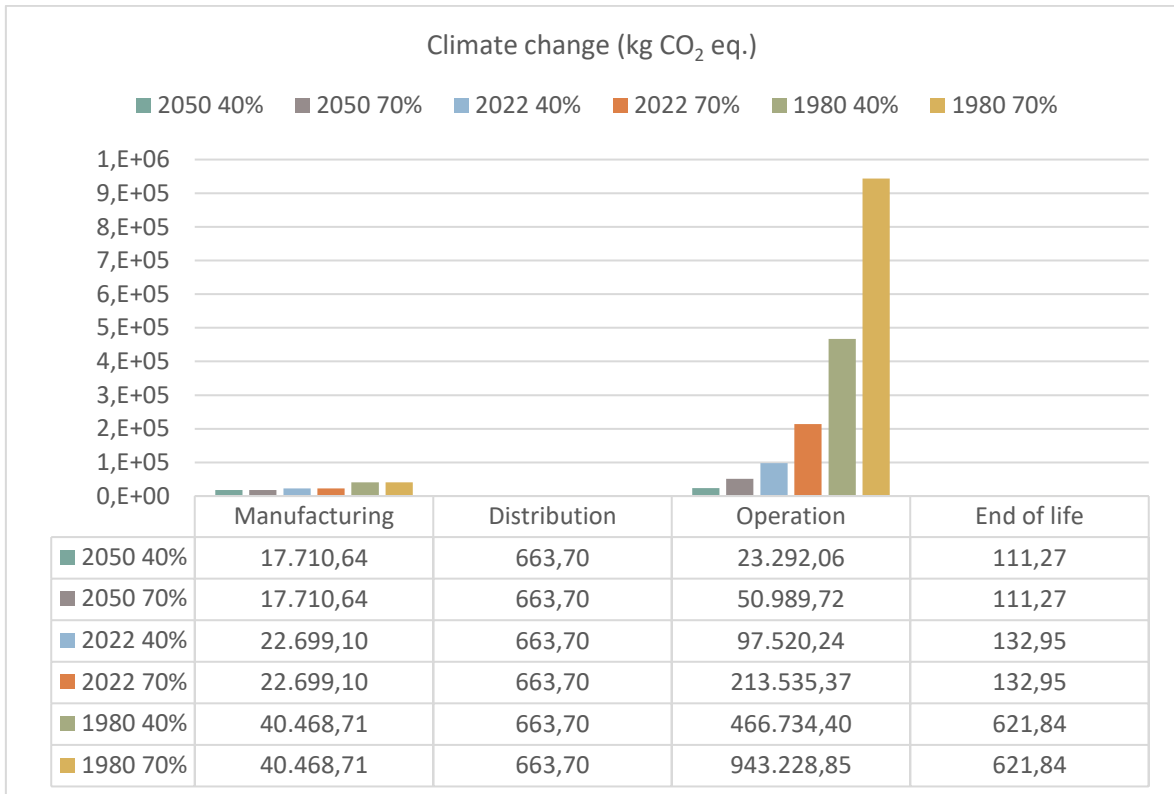


Figure 5: Characterization of the climate change impact (kg CO₂ eq.) of the transformer LCA.

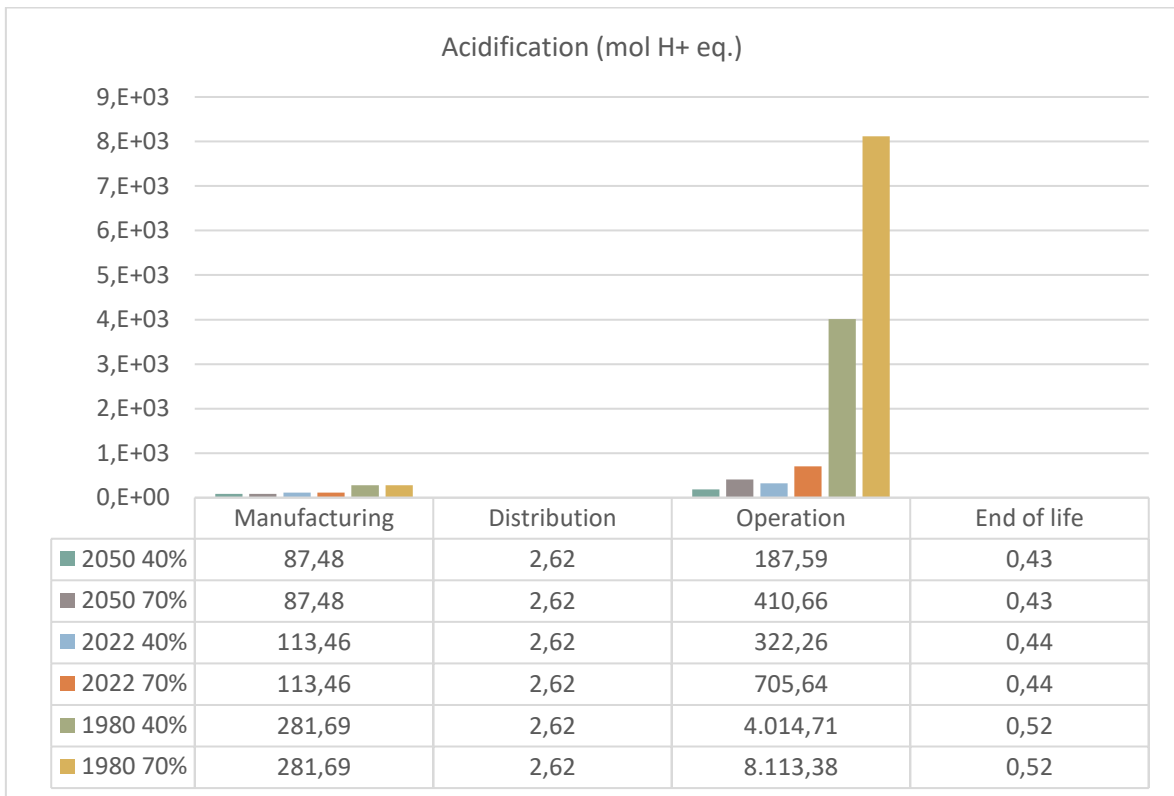


Figure 6: Characterization of the acidification impact (mol H⁺ eq.) of the transformer LCA.

In terms of acidification impact, a significant reduction is observed with the operation phase being the main contributor of this impact. The high value of acidification in this stage is due to the use of generation technologies based on coal resources, which release significant amounts of polluting gases and particles such as sulfur oxides and nitrogen oxides. The reduction of such technologies and the improvement of emission capture and reduction methods have significantly reduced this impact.

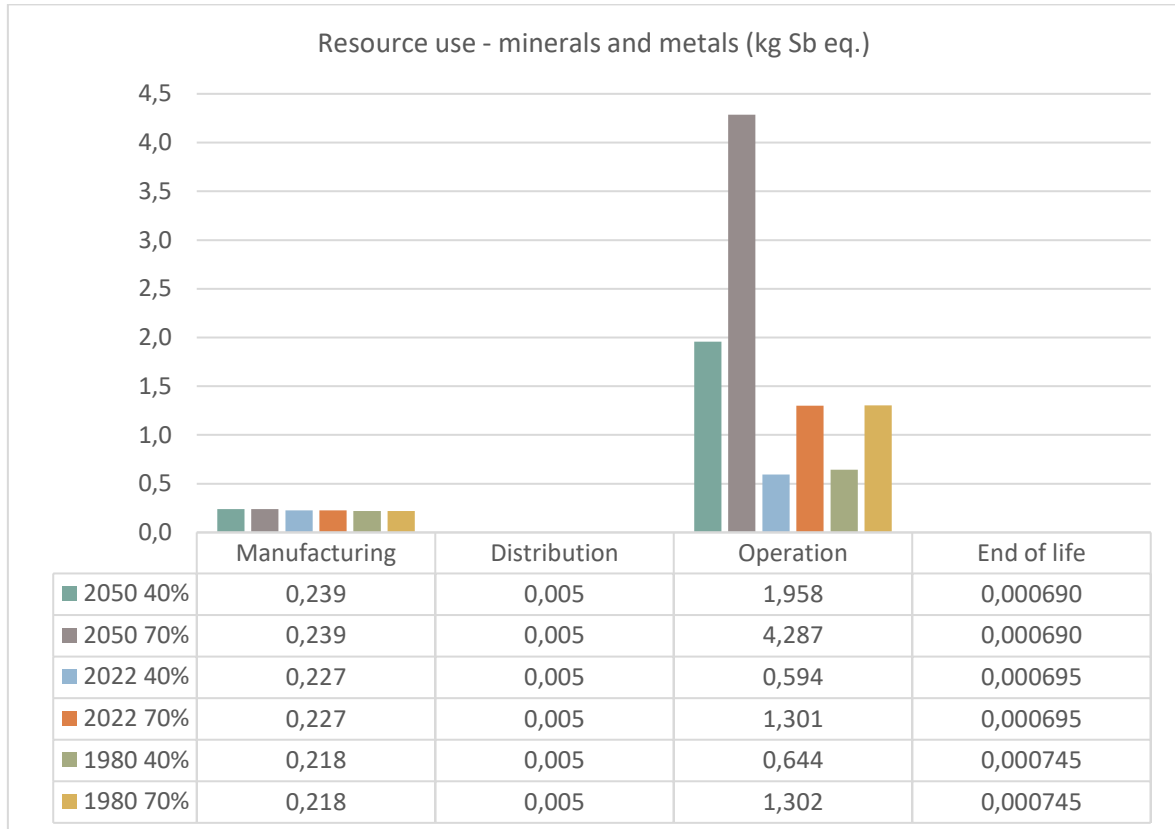


Figure 7: Characterization of the resource use – minerals and metals impact (kg Sb eq.) of the transformer LCA.

As for the resource use – minerals and metals, an increase is observed, especially in the operation phase when comparing the transformer from 2050 with 1980. This increase is attributed to the shift in the generation mix towards electronics-based technologies, which require these types of resources for their manufacturing. The generation mix used for the 2050 transformer is highly reliant on photovoltaic solar energy, which has a significant environmental impact in the resource use - minerals and metals.

The results obtained after weighting and normalizing the impact categories for the four study phases in the LCA of the three transformers (1980, 2022, 2050) are shown below.

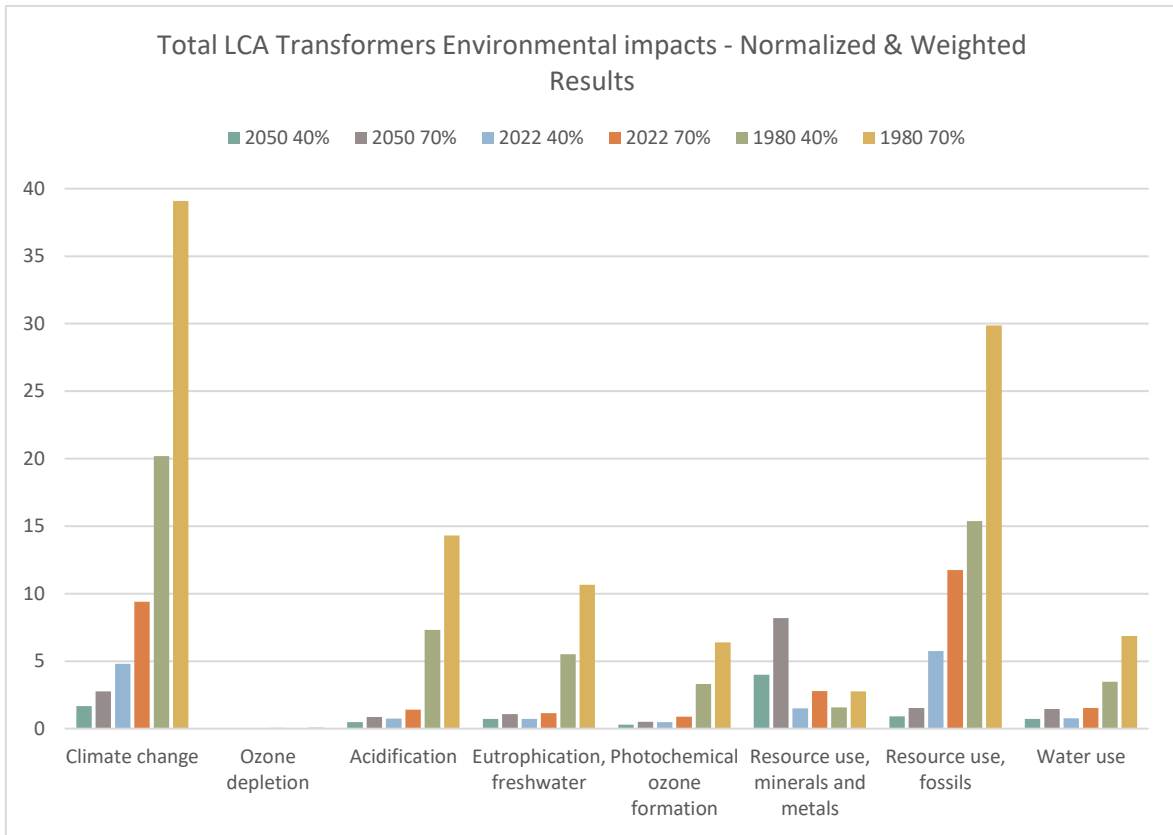


Figure 8: Normalized and weighted results of the transformer LCA.

Through this graph, it can be appreciated which impact categories are the most relevant: climate change, resource use of fossils and mineral and metals and acidification. It is also noticeable how the total impact of the transformer has decreased over time.

The LCA is also conducted through the created simplified tool for three transformers from 2022 from different manufacturers. The obtained characterized results are normalized and weighted following the EF 3.0 method described in the previous section, to obtain a score for the environmental performance of each transformer. This score can be considered in the green procurement processes for the transformers.

Table 1: Environmental performance single score.

Manufacturer	Single Score
Manufacturer 1	28,43
Manufacturer 2	36,05
Manufacturer 3	25,85

The total LCA impact categories normalized and weighted for each transformer are represented in a graph. As it is shown, the main impacts are related to climate change and resource use - minerals and metals, and acidification.

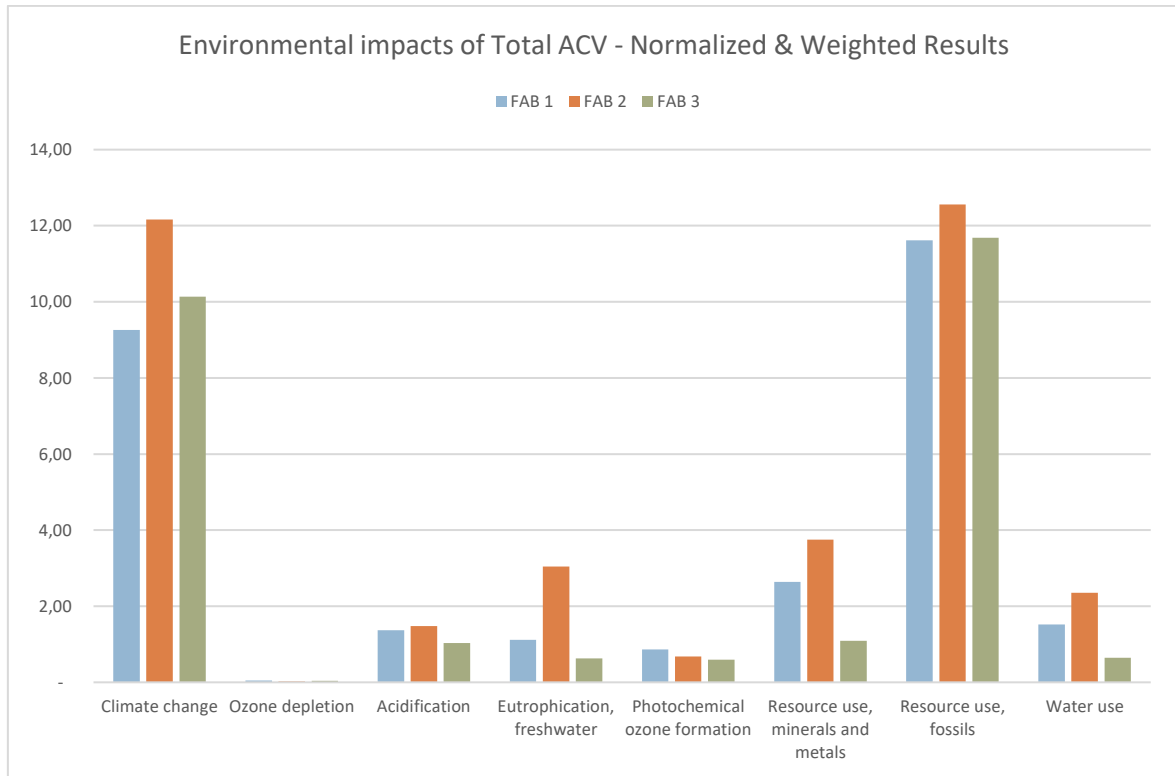


Figure 9: Normalized and weighted results with the EF 3.0 method of the transformer LCA for green procurement.

5. Conclusion

The objective of the project is to develop a user-friendly tool for conducting a Life Cycle Assessment (LCA) of medium-voltage transformers for the distribution grid to assess their environmental impact and integrate it into green procurement. To achieve this, an LCA of transformers manufactured in 1980, 2022, and 2050 was carried out, obtaining valuable inputs for the tool.

Through these LCAs, it was identified that the operation stage has the highest environmental impact (86.26% - single score after normalizing and weighting), primarily due to the transformers' long lifespan. Even though modern transformers have significantly reduced their energy losses compared to those from 1980, reducing the impact in this stage remains a challenge.

As a result, it was highlighted that the manufacturing stage, representing 13.41% (single score after normalizing and weighting) of the total impact, holds significant potential for reduction. When comparing the behavior of transformers from 2022 and 2050, a reduction in most impacts was observed, thanks to the utilization of recycled and reused materials. Consequently, actions that promote a circular economy and eco-design may reduce the environmental impact.

Based on the results, the tool was developed, focusing on the most relevant flows and designed to be user-friendly. Subsequently, a comparison of three transformers from different manufacturers in 2022 was conducted, assigning them scores based on their environmental performance. This straightforward exercise allowed for the establishment of environmental criteria for inclusion in green procurement processes.

In summary, conducting an LCA of a key component in the energy sector, such as transformers, is essential for promoting sustainable development. Understanding the environmental impact throughout the transformer's entire lifecycle is crucial for making decisions that take the environment into account.

6. References:

- [1] International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040:2006 gestión ambiental — análisis del ciclo de vida — principios y marco de referencia*.
- [2] International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14044:2006 gestión ambiental — análisis del ciclo de vida — requisitos y directrices*.
- [3] Manfredi, S., Allacker, K., Pelletier, N., Chomkhamsri, K., & de Souza, D. M. (2012). *Product environmental footprint (PEF) guide*. European Commission-Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability H08 Sustainability Assessment Unit.
- [4] PCR electronic and electrical products and systems, (2023).
- [5] EPDI Italy Regulations. (2021). Sub-category PCR electronic and electrical products and systems – power transformers.
- [6] SimaPro. (2023). *LCA software for informed changemakers*. <https://simapro.com/>
- [7] Ecoinvent. (2023). *Ecoinvent Database*. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- [8] EN 15804:2012+A2:2019 sostenibilidad en la construcción. declaraciones ambientales de producto. reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción. (2019).
- [9] Database & Support team at PRé Sustainability. (2022). SimaPro database manual - methods library. *SimaPro*, <https://simapro.com/wp-content/uploads/2022/07/DatabaseManualMethods.pdf>
- [10] Sala, S., Cerutti, A. K., & Pant, R. (2018). Development of a weighting approach for the environmental footprint. *Publications Office of the European Union*, (EUR 28562 EN) <https://10.2760/446145>
- [11] Instituto Nacional de Estadística, (. (2023). *Estadística sobre recogida y tratamiento de residuos*. <https://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?tpx=33000&L=0>
- [12] Haanstra, W., Gelpke, R., Braaksmá, A. J. J., Karakoc, I., & Den Hartog, C. (2019). *Paper 835 - integrating sustainability in asset management decision making: A case study on streamlined life cycle assessment in asset procurement*. 25th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution.

Índice de la memoria

1. Introducción	7
1.1 Contexto actual.	7
1.2 Motivación.	9
1.3 Justificación	9
1.4 Objetivo	10
1.5 Estructura	10
2. Estado de la cuestión	12
2.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	12
2.1.1 Historia del ACV.	12
2.2 La red de distribución y la transición energética	14
2.2.1 El Transformador	15
2.3 Evaluación del impacto ambiental de la red de distribución	19
2.3.1 ACV de un transformador	21
2.4 Software empleado	24
3. El ACV y el transformador	25
3.1 Normas ISO.	26
3.2 Guía de Huella Ambiental de Producto	27
3.3 PCR y Sub-PCR Reglas de Categoría de Producto	28
4. Definición del Objetivo y Alcance del ACV	30
4.1 Objetivos	30
4.2 Alcance	30
4.2.1 Unidad funcional	30
4.2.2 Límites del sistema	31
4.2.3 Base de datos:	33
4.2.4 Categorías de impacto.	33
4.2.5 Normalización y pesos de los factores.	35
5. Análisis del inventario	37
5.1 Upstream y Core	37
5.2 Downstream	40

5.2.1	<i>Downstream – distribución y puesta en servicio</i>	40
5.2.2	<i>Downstream – Operación</i>	41
5.2.3	<i>Downstream – Fin de vida</i>	45
6.	<i>Análisis del impacto e interpretación del ACV</i>	47
6.1	Principales impactos ambientales del ACV del transformador	48
6.2	Resultados normalizados y ponderados	55
6.3	Impacto ambiental de los mix de generación eléctrica.....	62
6.4	Reducción del impacto ambiental del ACV del transformador	63
6.5	Interpretación del ACV	65
7.	<i>Plantilla de la herramienta</i>	66
7.1	Objetivo de la herramienta	66
7.2	Estructura de la herramienta	66
7.3	Análisis de resultados de la herramienta	68
8.	<i>Conclusión y trabajos futuros</i>	71
9.	<i>Bibliografía</i>	73
	<i>ANEXO I: ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE</i>	78
I.	Objetivo de Desarrollo Sostenible principal: ODS 12, Producción y consumo responsables 78	
II.	Objetivos de Desarrollo Sostenibles secundarios	79
	<i>ANEXO II: Planificación</i>	81

Índice de figuras

Figura 1: Etapas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de un producto.....	8
Figura 2: Evolución de la potencia instalada de energía solar fotovoltaica (MW).....	14
Figura 3: Esquema de la evolución de la red de distribución.....	15
Figura 4: Esquema de un Centro de Transformación (CT).	16
Figura 5: Esquema de un transformador monofásico ideal.	18
Figura 6: Esquema del proceso de compra verde.	20
Figura 7: Resumen de las normas empleadas en el ACV.	25
Figura 8: Etapas del ACV.....	26
Figura 9: Módulos de ciclo de vida de un transformador de media tensión.	32
Figura 10: Factores de ponderación de acuerdo con la metodología EF 3.0 incluyendo los impactos de toxicidad humana [41].	36
Figura 11: Factores de ponderación de acuerdo con la metodología EF 3.0 excluyendo los impactos de toxicidad humana [41].	36
Figura 12: Factores de ponderación proporcionales para el ACV del transformador con el método EF 3.0 [41].....	36
Figura 13: Placa de características de un transformador de 1970-1980.	37
Figura 14: Materias primas (kg) del fabricante número 1 para el transformador de 2022.....	39
Figura 15: Materias primas (kg) del fabricante número 2 para el transformador de 2022.....	39
Figura 16: Materias primas (kg) del fabricante número 3 para el transformador de 2022.....	39
Figura 17: Materias primas (kg) del fabricante número 1 para el transformador de 1980.....	39
Figura 18: Materias primas (kg) del fabricante número 2 para el transformador de 1980.....	40
Figura 19: Materias primas (kg) del fabricante número 3 para el transformador de 1980.....	40
Figura 20: Distancia media de distribución para España. Elaboración con Google Earth.....	41
Figura 21: Mix de generación eléctrica para España 2022.....	44
Figura 22: Mix de generación eléctrica para España 2022.....	44
Figura 23: Mix de generación eléctrica para España 2022.....	45
Figura 24: Esquema de la realización del análisis de impacto.	47
Figura 25: Caracterización del impacto de cambio climático (kg CO ₂ eq.) del ACV del transformador.	48
Figura 26: Caracterización del impacto de agotamiento de recursos – fósiles (MJ) del ACV del transformador.	50
Figura 27: Caracterización del impacto de acidificación (mol H ⁺ eq.) del ACV del transformador.	51
Figura 28: Caracterización del agotamiento de recursos – minerales y metales (kg Sb eq.) del ACV del transformador.	52
Figura 29: Caracterización de la eutrofización del agua (kg P eq.) del ACV del transformador.	53
Figura 30: Caracterización del consumo de agua (m ³ deprive) del ACV del transformador.....	53
Figura 31: Caracterización del agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.) del ACV del transformador.	54

Figura 32: Caracterización de la formación de ozono fotoquímico (kg NMVOC eq.) del ACV del transformador.	55
Figura 33: Resultados normalizados y ponderados del Total del ACV del transformador.	58
Figura 34: Resultados de la Operación del ACV del transformador.	59
Figura 35: Resultados de la Fabricación del ACV del transformador.	61
Figura 36: Impacto ambiental de los mix de generación eléctrica.	63
Figura 37: Herramienta de ACV simplificada – datos de entrada.	67
Figura 38: Herramienta de ACV simplificada – factores de caracterización - 1.	67
Figura 39: Herramienta de ACV simplificada – factores de caracterización - 2.	68
Figura 40: Herramienta de ACV simplificada – resumen de resultados.	68
Figura 41: Resultados del impacto ambiental total de los transformadores de los fabricantes 1, 2 y 3 normalizados y ponderados.	70
Figura 42: ODS enmarcados dentro del Trabajo de Fin de Máster.	78
Figura 43: Diagrama de Gantt, planificación del Trabajo Fin de Máster.	81

Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros de Operación de los Transformadores de Potencia de la “Sub-PCR EN 2021 03 11 for Power Transformers” [26].	29
Tabla 2: Parámetros de impacto ambiental básicos la EN 15804:2012+A2:2019 [37].	33
Tabla 3: Factores de normalización y ponderación para las categorías de impacto utilizadas [38].	35
Tabla 4: Operación del transformador de 1970-1980.	43
Tabla 5: Operación del transformador 2022.	43
Tabla 6: Operación del transformador de 2050.	43
Tabla 7: Tratamiento de los residuos extraído del INE para el año 2022 [46].	46
Tabla 8: Tratamiento de los residuos extraído del INE para el año 2022 [46].	46
Tabla 9: Resultados del ACV del transformador normalizados y ponderados.	56
Tabla 10: Caracterización de los impactos para los mixes de generación incluidos en el ACV del transformador.	62
Tabla 11: Reducción de los impactos ambientales del ACV del transformador.	64
Tabla 12: Reducción de los impactos ambientales del ACV del transformador.	65
Tabla 13: Caracterización de los impactos ambientales para tres transformadores de 2022.	69
Tabla 14: Puntuación única del desempeño ambiental de cada transformador.	69

Abreviaciones

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
BT	Baja Tensión
CENELEC	Comité Europeo de Normalización Electrotécnica
CIREED	International Conference on Electricity Distribution
CT	Centro de Transformación
CT	Comité Técnico
DAP	Declaración Ambiental de Producto
DER	Recursos de Energía Distribuida
EF	Huella Ambiental
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HAP	Huella Ambiental de Producto
ICV	Inventario del Ciclo de Vida
	Sistema Internacional de Datos del Ciclo de Vida de
ILCD	Referencia
INE	Instituto Nacional de Estadística
ISO	Organización Internacional de Normalización
MT	Media Tensión
OEF	Huella Ambiental de la Organización
PCR	Reglas de Categoría de Producto
PNIEC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
PPI	Política Integrada de Productos
REE	Red Eléctrica de España
TFM	Trabajo de Fin de Máster
UE	Unión Europea

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO ACTUAL.

La sostenibilidad es un concepto que se ha vuelto fundamental en todos los ámbitos de la actividad humana, especialmente en los últimos años. Las empresas, los gobiernos y las instituciones educativas hacen referencia de manera constante a este concepto, el cual fue definido en 1987 por la Comisión Brundtland de las Naciones Unidas:

“Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs” [1].

El creciente enfoque en las acciones para cumplir con el concepto de sostenibilidad se debe a un aumento de los impactos negativos de la actividad humana en el medio ambiente, tales como el aumento de la temperatura media de la Tierra y el incremento de fenómenos meteorológicos extremos [2]. La Tierra está experimentando cambios en los patrones climáticos, incluyendo la temperatura, las precipitaciones y el viento, como resultado del cambio climático, uno de los principales desafíos que enfrenta la humanidad. Por tanto, es crucial encontrar soluciones para mitigar estos impactos y evitar alterar el equilibrio del medio ambiente.

A lo largo de la historia, los científicos han trabajado en conjunto para analizar la evolución del cambio climático y su impacto en la Tierra y en las actividades humanas. En 2009, Johan Rockström lideró un equipo de 28 científicos para estudiar e identificar los procesos que regulan la estabilidad y resiliencia de la Tierra [3]. Su estudio los llevó a definir un conjunto de límites que representan *“las constantes vitales”* del sistema terrestre, que recibieron el nombre de límites planetarios. Sobrepasar uno de estos límites lleva a una situación de no retorno, ya que indica que el ser humano ha generado un impacto en el medio ambiente de una magnitud considerable, capaz de alterar el equilibrio de los procesos más esenciales del sistema terrestre.

La situación actual con respecto a estos límites es alarmante, durante el 2022 se publicaron en diferentes medios científicos como se estaban sobrepasado un nuevo límite planetario: nuevas entidades [4]. La estabilidad de los ciclos terrestres se está viendo gravemente alterada por la actividad humana. Los límites planetarios que representan la integridad de la biosfera, los flujos bioquímicos (fósforo y nitrógeno) y la incorporación de nuevas entidades se encuentran en valores dentro de la zona de alto riesgo, lo cual puede provocar reacciones en cadena que perjudiquen gravemente el equilibrio terrestre.

Ante esta situación de emergencia, es necesario un cambio en la actividad humana, que reduzca el impacto negativo en el medio ambiente y refuerce el positivo. Para ello es necesario promover el desarrollo sostenible con el que se pretende mejorar la calidad de vida y el bienestar de las

generaciones presentes y futuras, a través del desarrollo económico, la protección del medio ambiente y la justicia social.

La Unión Europea (UE) ha realizado un esfuerzo significativo en potenciar el desarrollo sostenible en los últimos años, creando un marco legislativo que promueve inversiones con impacto positivo en el medio ambiente. Sin embargo, para evaluar qué inversiones tienen un menor impacto negativo en el medio ambiente es necesario utilizar un método que permita comparar diferentes procesos o productos. Así, ha crecido la necesidad de desarrollar una técnica de evaluación ambiental basada en la ciencia. Para cumplir con esta necesidad, se ha desarrollado el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Esta metodología consiste en recoger y evaluar las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un sistema o de producto a lo largo de su ciclo de vida completo, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.

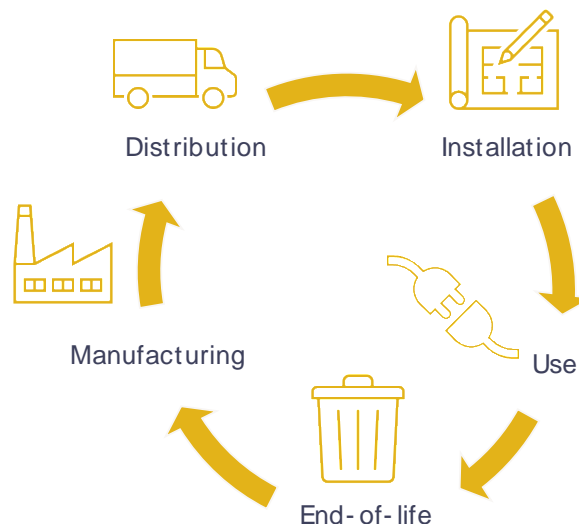


Figura 1: Etapas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de un producto.

El ACV es una herramienta integral que evalúa el desempeño ambiental de productos o servicios, considerando todas las etapas de su ciclo de vida, y que permite evaluar una amplia gama de impactos ambientales como el cambio climático, la acidificación o la eutrofización. Esto proporciona una base científica para tomar decisiones informadas en el diseño de productos y contribuye a la promoción de prácticas más sostenibles en la UE y en otros lugares.

Como medida principal de lucha contra el cambio climático, la UE apuesta por la electrificación de la economía lo cual requiere un importante despliegue de equipos eléctricos de Media Tensión (MT) para la integración de los Recursos de Energía Distribuida (DER) en el sistema eléctrico, que incluyen las energías renovables para el autoconsumo, las bombas de calor y el vehículo eléctrico.

El Pacto Verde Europeo [5] de la UE establece objetivos ambiciosos para abordar el cambio climático y lograr la neutralidad climática para 2050. En línea con estos objetivos, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 [6] de España establece medidas y objetivos para

reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover una economía sostenible y baja en carbono.

Entre los objetivos del PNIEC se incluyen una reducción del 21% de las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a 1990, una proporción del 42% de renovables en el consumo total de energía final en la UE, una mejora del 39,6% en la eficiencia energética y un 74% de generación eléctrica renovable. Estas acciones contribuyen a los objetivos del Pacto Verde Europeo y al compromiso de la UE con la lucha contra el cambio climático.

Para integrar los DER en el sistema eléctrico, se requiere una red eléctrica avanzada y moderna que incluya las últimas tecnologías. En este sentido, la reducción del impacto ambiental de los equipos eléctricos de MT, que son fundamentales para la integración de los DER, se ha convertido en un reto importante y necesario para los fabricantes y las compañías eléctricas. El ACV es una herramienta valiosa para evaluar y mejorar el impacto ambiental de los productos a lo largo de toda su cadena de suministro, lo que puede ayudar a las empresas a reducir su impacto ambiental y a contribuir a los objetivos del PNIEC de España.

1.2 MOTIVACIÓN

La motivación principal para llevar a cabo este Trabajo de Fin de Máster ha sido el interés por aprender más sobre un campo en pleno desarrollo y que está cobrando cada vez más importancia. El desarrollo sostenible es un hito necesario para el futuro, el impacto ambiental debido a la actividad humana está alterando gravemente el equilibrio terrestre y hay que empezar a llevar a cabo acciones.

Habitualmente la toma de decisiones está basada fundamentalmente en parámetros financieros, por tanto, es complejo introducir el impacto ambiental que cada alternativa lleva asociada, pues ha sido siempre difícil cuantificar el valor monetario del impacto de cada acción. Disponer de un método que permita contabilizar de manera científica los impactos de las diferentes alternativas es una potente herramienta que puede dotar de información trascendente en el gobierno de una empresa u organización.

El aprendizaje y desarrollo de un ACV es una de las acciones que quiero llevar a cabo, ya que ser capaz de emplear este método me otorga la capacidad de conocer el impacto ambiental de las decisiones que se toman y adquirir el conocimiento necesario para integrar en ellas criterios ambientales.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En el contexto de la transición energética, el transformador de media tensión juega un papel crucial. Con el fomento del autoconsumo energético en viviendas, pequeñas industrias y comercios, se ha vuelto necesario desarrollar y renovar la red de baja tensión de distribución eléctrica. La integración

del autoconsumo en la red requiere de la actualización y mejora de los equipos eléctricos que la conforman, incluyendo los transformadores. Por lo tanto, contar con una herramienta que permita evaluar diferentes alternativas de transformadores resulta fundamental para elegir equipos con un menor impacto ambiental y dirigir todas las acciones hacia el desarrollo sostenible.

La introducción del ACV en productos tan relevantes para la transición energética es de vital importancia. Con la electrificación de la economía, se busca mitigar el cambio climático, por lo que es crucial examinar las diferentes opciones y optar por soluciones más sostenibles que consideren el ciclo de vida completo de los equipos eléctricos. El ACV proporciona una visión holística de los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas, pasando por la fabricación, uso y disposición final. Esto permite tomar decisiones informadas y promover la adopción de prácticas más sostenibles en la elección de transformadores y otros equipos eléctricos, contribuyendo así al desarrollo sostenible del sector energético.

1.4 OBJETIVO

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) tiene como objetivo la elaboración de una herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con la que sea sencillo estudiar el impacto medioambiental que tiene un transformador de media tensión. La herramienta permitirá la comparación del impacto ambiental de equipos de diferentes fabricantes mediante la introducción de las características principales de estos equipos para integrar criterios de desempeño medioambiental en los procesos de compra.

Para alcanzar este objetivo principal, el proyecto se divide en los siguientes objetivos específicos:

1. Modelado de un ACV de un transformador estándar actual.
2. Evaluación del ACV de transformadores del pasado, presente y futuro a fin de identificar los impactos y las etapas más relevantes.
3. Desarrollo de una herramienta simplificada basada en el modelo de ACV que permita comparar de manera sencilla el impacto ambiental para un proceso de compra.

Con la realización de este proyecto, se busca proporcionar una herramienta práctica y eficaz que facilite la toma de decisiones en la adquisición de transformadores, considerando su impacto ambiental y promoviendo la compra verde.

1.5 ESTRUCTURA

El presente trabajo se divide en 8 capítulos a partir de los cuales se explica el estudio realizado. En el primer capítulo se introduce el trabajo mediante una breve contextualización del momento actual, la motivación y el objetivo del trabajo.

En el segundo capítulo se explica el estado de la cuestión del Análisis de Ciclo de Vida, la metodología que se va a seguir para analizar el impacto ambiental y las necesidades de la red de distribución y el transformador ante el cambio de paradigma de la generación eléctrica. Además, se presentan estudios relacionados y se detalla el software y las bases de datos empleadas en el trabajo.

En el tercer capítulo se expone la normativa seguida para la elaboración del ACV, resumiendo los puntos más relevantes tenidos en cuenta en el trabajo. En el cuarto capítulo se desarrolla el objetivo y alcance del ACV. Para ello, se define la unidad funcional, los límites del sistema y las categorías de impacto, entre otros apartados.

En el quinto capítulo se explica el análisis de inventario a través del cual se describe cada proceso modelizado en el ACV, los escenarios considerados, los datos empleados y los cálculos realizados. Tras esto, en el capítulo sexto se tratan las últimas fases del ACV, análisis del impacto e interpretación del ACV, donde se analizan los resultados obtenidos.

En el séptimo capítulo se presenta la herramienta elaborada a partir de los ACV realizados. Se muestra la plantilla de la herramienta y los resultados obtenidos para su integración en la compra verde de tres transformadores procedentes de fabricantes diferentes. Por último, en el capítulo octavo, se tratan las conclusiones obtenidas tras la finalización del trabajo y las líneas futuras a realizar.

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología basada en la ciencia, que requiere del estudio de todos los procesos desde la creación del producto hasta su fin de vida. El ACV es un método cuantitativo, transparente y replicable, características esenciales para su uso como método de clasificación del impacto ambiental entre productos procedentes de diferentes fabricantes.

2.1.1 Historia del ACV

El ACV ha evolucionado, mejorando y estandarizando los métodos aplicados. Entre los primeros usos de este potente método se encuentra el estudio de análisis de ciclo se realizado en el año 1963 para estudiar los subproductos y productos finales de la Central Nuclear de Douglas Point. Tras esto, también se realizaron algunos estudios orientados a minimizar los costes a la vez que se minimizaba el impacto ambiental. Entre ellos, Coca-Cola en 1969 que realiza un estudio en el que compara los diferentes recipientes y la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU que en 1974 publica el primer estudio público de análisis de ciclo de nueve alternativas de recipientes [7].

Otro importante hito para el ACV es el desarrollo de diferentes herramientas profesionales para su realización. En el año 1984 se publica la primera versión del software GaBi de uso comercial y que se ha usado de manera extendida como herramienta profesional para realizar un ACV. Unos años más tarde, en 1990, se publica también la primera versión de SimaPro, software comercial para la realización de un ACV que se ha convertido en una de las principales herramientas profesionales con este fin.

Con el objetivo de formalizar la metodología del ACV en 1990 la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC) acuña el término de *"Life Cycle Assessment"*, facilitando así su evolución, mediante la publicación y el estudio del método bajo un mismo nombre.

Para la evolución de la metodología era necesario la disponibilidad de bases de datos fiables y accesibles para las diferentes industrias, organizaciones, corporaciones... que quisieran realizar este análisis. Por este motivo, varias instituciones llevaron a cabo una investigación y desarrollo de bases de datos que fuesen estándar para cualquier estudio a nivel global.

En 1992 se publica la primera metodología para ACV en la que se proponen unas categorías de impacto globales asociadas a unos factores normalizados, basados en valores europeos promedio.

SETAC continúa con su labor de normalización y define en el año 1993 los principios, la terminología y la metodología base para el ACV [8]. A continuación de esto, se comienza a trabajar a través de la Organización Internacional de Normalización (ISO) en la elaboración del conjunto de normas que

finalmente creen un estándar base para la elaboración del ACV. Entre estas normas publicadas entre los años 1997 y 2007 se encuentra las siguientes:

- ISO 14040:2006 Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia [9].
- ISO 14044:2006 Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices [10].

En el año 2003 se publica la primera versión de Ecoinvent (1.01) que es una de las principales bases de datos del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) usadas a nivel mundial. Econinvent recoge los factores de caracterización necesarios para las diferentes etapas que engloban el estudio de un producto.

A partir del año 2006, tras la actualización de las normas ISO, se publicaron diversas metodologías, bases de datos y herramientas de cálculo que definían los flujos entre las entradas y las salidas, las relaciones entre las categorías y los factores de caracterización en la evaluación del ciclo de vida. Esto ha dificultado la comparación entre los resultados de diferentes estudios de ACV.

El objetivo del ACV es proporcionar una herramienta objetiva para comparar el impacto ambiental de diferentes productos. Sin embargo, tener diferentes alternativas y metodologías que varían en la base del cálculo no permite comparar entre sí el ACV de productos que siguen diferentes métodos.

Con el fin de simplificar y facilitar la comparación entre los resultados del ACV, la UE publicó en 2012 la Guía de Huella Ambiental de Producto (HAP), la cual establece requisitos y contenidos mínimos que deben cumplirse en el estudio para que pueda utilizarse de manera oficial. La PEF tiene como objetivo establecer una metodología común y armonizada que permita la comparación transparente y confiable de los resultados de la evaluación del ciclo de vida de productos en la UE [11].

Tras la publicación de la PEF, se han elaborado diferentes Reglas de Categoría de Producto (PCR), que son documentos con requisitos más específicos para la realización de un ACV en función del tipo de producto sobre el que se esté realizando el estudio. Esto se debe a que con la realización de diferentes ACV se ha ido demostrando que hay categorías de impacto que son más trascendentes que otras para un determinado grupo de productos y, por tanto, puede obviarse el estudio de alguna categoría, o, por otro lado, que es necesario incluir el estudio adicional de otros aspectos porque tienen importantes consecuencias en alguna de las categorías de impacto. Por este motivo, la realización del ACV siguiendo las PCR asegura una calidad mínima.

La verificación de los ACV es una pieza clave en la realización de estos estudios. Para ello, existen las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) que son los análisis realizados siguiendo las PCR que se emplean para verificar el ACV. Las PCR suelen incluir criterios específicos sobre los límites que deben establecerse para la elaboración del ACV, la definición más adecuada de la unidad funcional, las categorías de impacto que deberían estudiarse, un mínimo de calidad de datos, etc., lo cual es verificado mediante una auditoría para otorgar al producto la DAP.

2.2 LA RED DE DISTRIBUCIÓN Y LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Las políticas y las leyes destinadas a acelerar la transición energética están generando un resultado positivo, la potencia instalada de energías renovables se ha incrementado significativamente a nivel mundial. El crecimiento se está produciendo también a nivel nacional, de acuerdo con los datos recogidos por Red Eléctrica de España (REE) [12], el operador del sistema, la potencia instalada de energías renovables, especialmente fotovoltaica y eólica, se ha incrementado notablemente en los últimos años.

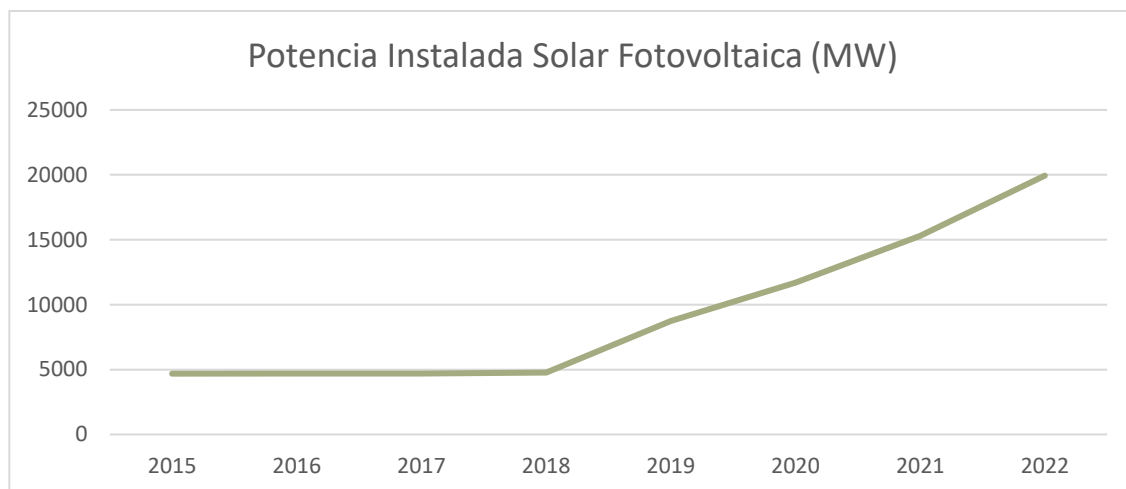


Figura 2: Evolución de la potencia instalada de energía solar fotovoltaica (MW).

Pero, la capacidad de la red de distribución es limitada, ante un cambio de paradigma en la producción de energía eléctrica hay que estudiar los límites actuales de la infraestructura existente. Por ello, se están dedicando importantes esfuerzos en el análisis del impacto de la integración de renovables en la red, ejemplo de ello el artículo *“Radical change in the Spanish grid: Renewable energy generation profile and electric energy excess”* [13] donde se analiza como el efecto de la instalación de energías renovables puede ser mayor de lo esperado, alterando las curvas horarias de generación y demanda en exceso, y siendo necesario el desarrollo de tecnología para la evacuación de la electricidad.

Los problemas relacionados con la capacidad de la red no solo afectan a España, países como Alemania, que apuesta también por una alta penetración de energías renovables, prevé la necesidad de desarrollar su infraestructura para integrar estas tecnologías. En el artículo *“Improved Low Voltage Grid-Integration of Photovoltaic Systems in Germany”* [14] se indica que es necesaria una modernización de la red de distribución que la dote de mayor flexibilidad para aumentar la capacidad de la red y alcanzar los objetivos de la transición energética.

El principal crecimiento en instalaciones de energías renovables se está produciendo en los usuarios finales, como pequeñas industrias, comercios o viviendas, que reducen su consumo energético gracias a la instalación de energía solar fotovoltaica para autoconsumo. Para ello, es necesario

desarrollar y ampliar la infraestructura de las redes de baja y media tensión, lo que permitirá una mayor conexión de autoconsumos y, por tanto, una mayor capacidad de integración de renovables en el sistema eléctrico. Por otro lado, el fomento del vehículo eléctrico y la bomba de calor, que junto con la fotovoltaica representan los Recursos de Energía Distribuida (DER) también requiere una mayor capacidad de la red de distribución, ya que aumenta la potencia de consumo y las curvas de demanda.

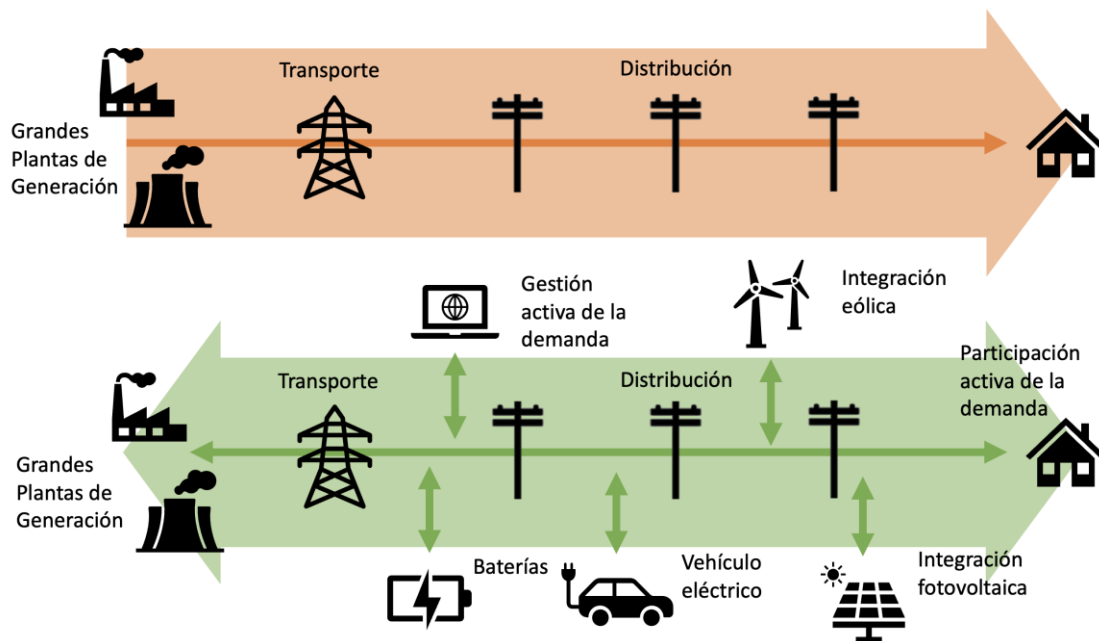


Figura 3: Esquema de la evolución de la red de distribución.

La expansión y modernización de las redes de distribución, junto con la implementación de tecnologías avanzadas de control y gestión de la energía permitirán una mayor capacidad de integración de renovables y una mayor seguridad en el suministro eléctrico. Esto constituye un paso clave en la transición hacia un modelo energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, la red de distribución es la columna vertebral del sistema eléctrico y su desarrollo es esencial, pero este debe ser sostenible.

2.2.1 El Transformador

El sistema eléctrico es el conjunto de infraestructuras necesarias para el transporte y distribución de la electricidad desde los puntos de generación hasta los puntos de consumo. La clasificación habitual del sistema eléctrico se realiza en función de la tensión:

- Muy Alta Tensión
- Alta Tensión.
- Media Tensión.
- Baja Tensión.

Los puntos de generación y consumo se reparten a lo largo de las líneas eléctricas, las subestaciones o los centros de transformación conectándose en función de la potencia a la tensión más adecuada. El transformador es la máquina eléctrica encargada de modificar el nivel de tensión en todos los puntos de la infraestructura para el transporte de la electricidad o para obtener energía eléctrica con los niveles de tensión adecuados para el consumo o la generación.

Los DER se conectan en las redes de BT ya que son elementos que utilizan los consumidores finales y suelen conectar bajas potencias. El Centro de Transformación (CT) es la instalación encargada de modificar la MT y transformarla en BT a distribuir por las diferentes líneas. Para ello cuenta con tres elementos principales:

- **Transformador:** máquina eléctrica bidireccional, que es capaz de transmitir energía eléctrica entre distintos niveles de tensión y, por tanto, corriente, mediante un campo electromagnético alterno con elevados rendimientos.
- **Cuadro de baja tensión:** elemento mediante el cual se distribuyen las líneas que llegan al consumidor final tras la transformación de la tensión.
- **Celdas:** equipo en el que se integran los elementos de protección y medida.

Centro de Transformación (CT)

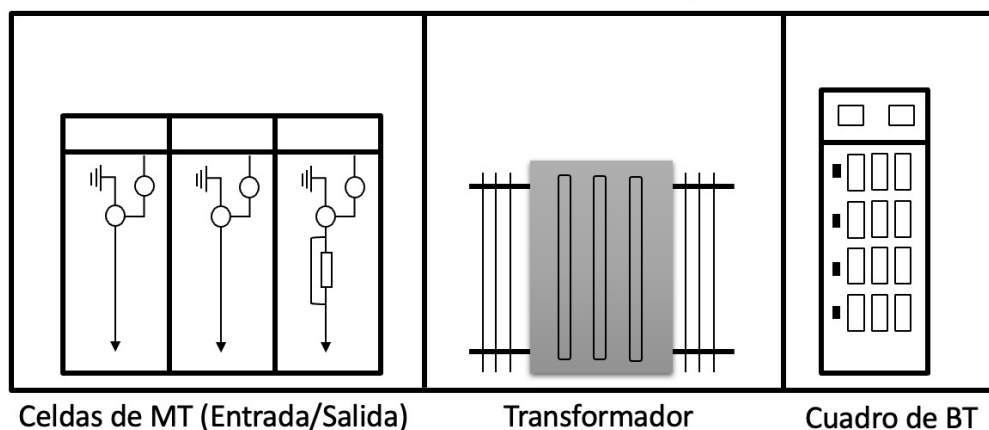


Figura 4: Esquema de un Centro de Transformación (CT).

Los transformadores están formados por elementos estáticos encargados de transmitir la energía eléctrica en forma de corriente alterna a través de distintos niveles de tensión mediante un campo magnético. Los transformadores utilizados en las redes eléctricas realizan dicha transformación con un elevado rendimiento.

Existen distintas clasificaciones para los transformadores, que se basan en diversos criterios. Uno de ellos es el número de fases, dividiéndolos en transformadores trifásicos y monofásicos. Otro criterio de clasificación es el sentido de la potencia, lo que determina si el transformador es elevador o reductor. Además, también se pueden clasificar según el refrigerante utilizado, siendo

comunes los transformadores de aceite, silicona o secos. En cualquier caso, independientemente del tipo de transformador, todos ellos están compuestos por tres sistemas fundamentales: los devanados, el circuito magnético y elementos adicionales que proporcionan funciones de refrigeración, protección y envolvente.

LOS DEVANADOS DEL TRANSFORMADOR:

Los devanados del transformador son las bobinas de alambre que se enrollan alrededor del núcleo del transformador y son fundamentales para su funcionamiento ya que por ellos circula la corriente eléctrica y se conectan los circuitos eléctricos exteriores.

Hay dos devanados principales en un transformador: el devanado primario, por el que se recibe la potencia, y el devanado secundario, por el que se entrega la potencia, aislados eléctricamente uno del otro, situados alrededor del núcleo magnético del transformador.

El devanado primario tiene la fuente de alimentación de entrada y al aplicar corriente alterna se genera un campo magnético en el núcleo del transformador. El primario es que tiene mayor tensión y menor número de espiras. El devanado secundario proporciona la salida de energía del transformador y tiene mayor número de espiras.

Además, los transformadores pueden contar con otros devanados adicionales para proporcionar funciones específicas como una conexión para regular la tensión o la corriente.

EL CIRCUITO MAGNÉTICO:

El circuito magnético es el camino que sigue el flujo magnético generado por los devanados alrededor del núcleo del transformador y está compuesto por el núcleo magnético y las partes que lo conectan. El objetivo de este circuito es que la inducción magnética máxima que circula por él sea igual en todas las secciones transversales al flujo.

El núcleo magnético del transformador generalmente está hecho de material ferromagnético, como hierro laminado o acero al silicio. Consiste en un conjunto de láminas apiladas o enrolladas para reducir las pérdidas de energía debido a corrientes inducidas, conocidas como corrientes de Foucault.

El flujo magnético generado por los devanados primario y secundario atraviesa el núcleo del transformador a través de los siguientes componentes que permiten el paso del flujo magnético a través de un camino cerrado y eficiente, asegurando la transferencia de energía electromagnética entre ellos:

- **Columnas:** partes verticales del núcleo que conectan las secciones superior e inferior.
- **Yugo:** parte superior y/o inferior del núcleo que conecta las columnas y forma un camino cerrado para el flujo magnético, cerrando el circuito magnético y evitando fugas del flujo.

- **Entrehierro:** espacio pequeño entre las columnas del núcleo que permite aumentar la reluctancia del circuito magnético, lo que ayuda a controlar la relación de transformación del transformador y regular las características del flujo magnético.

LOS ELEMENTOS ADICIONALES:

La envolvente del transformador dependerá del medio refrigerante utilizado y de la ubicación. En función del refrigerante se pueden dividir en dos tipos:

- **Transformadores secos:** no tienen refrigerante, suelen emplearse para pequeñas potencias. Habitualmente no se fabrican con envolvente, aunque en algunos casos pueden incluir una sencilla para proteger contra el contacto de partes en tensión.
- **Transformadores de aceite o de resina:** utilizan un aceite como refrigerante, para ello se llenan de aceite. Se fabrican con una cuba que actúa como depósito. Suelen incluir en su lateral aletas o radiadores que facilitan la refrigeración que puede ser natural o forzada.

FUNCIONAMIENTO:

El funcionamiento del transformador se basa en la inducción electromagnética, al aplicar una corriente alterna en el devanado primario que genera un campo magnético variable alrededor del núcleo del transformador, induciendo una corriente en el devanado secundario.

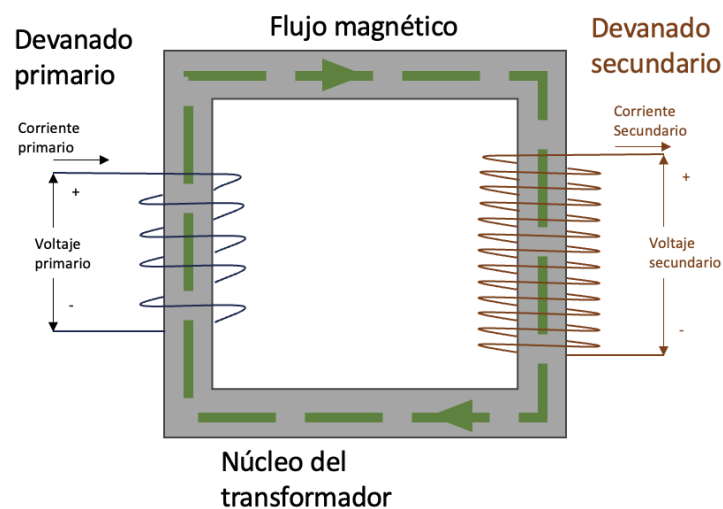


Figura 5: Esquema de un transformador monofásico.

Existe una relación directa entre la relación de espiras del devanado primario y del devanado secundario que es semejante a la relación entre la tensión del devanado primario y del secundario. Este valor es el parámetro más importante de un transformador, aunque la relación solo concuerda exactamente para el estudio de un transformador ideal. Un transformador real en carga tiene caídas de tensión en los devanados, por lo que la relación de transformación es aproximada.

Transformador ideal

$$U_1 = E_1; U_2 = E_2$$

$$r_{te} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Transformador real

$$U_1 \approx E_1; U_2 \approx E_2 \quad 1$$

$$r_{te} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad 2$$

PÉRDIDAS:

El transformador es una máquina eléctrica estática sin elementos móviles, lo que reduce las pérdidas. No obstante, todas las máquinas eléctricas reales están sujetas a un conjunto de pérdidas asociadas a la resistencia de los circuitos eléctricos y magnéticos. Las pérdidas del transformador pueden dividirse en dos grupos:

- **Pérdidas en vacío (P_0):** también conocidas como pérdidas en el hierro, son pérdidas constantes asociadas al circuito magnético del transformador. Estas pérdidas se producen debido al ciclo de histéresis que genera resistencia interna en el material del núcleo magnético ante cambios magnéticos durante el funcionamiento del transformador, parte de esta energía se disipa en forma de calor. El valor de las pérdidas en vacío es proporcional a la tensión de alimentación del devanado primario.
- **Pérdidas debidas a la carga (P_k):** también conocidas como pérdidas en el cobre, varían en función de la corriente que circula por los devanados. Se originan por la resistencia eléctrica que se produce en el cobre ante el paso de la corriente eléctrica, produciendo una disipación de energía en forma de calor (corriente de Foucault). Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente, que varía con la carga. [15].

2.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Como se ha visto, la electrificación de la economía requiere de un desarrollo de la red de distribución. El objetivo de fomentar los DER es reducir el impacto medioambiental que tienen las actividades humanas. Por tanto, incluir criterios evaluación ambiental en el desarrollo de la red es fundamental. En el artículo *"Integrating Sustainability in asset management decision making: a case study on streamlined Life Cycle Assessment in asset procurement"* [16] se describe la responsabilidad que tienen los distribuidores en los procesos de compra de los productos, incluir criterios ambientales puede inducir un importante cambio en los procesos de fabricación. Para ello, la empresa distribuidora *Liander* de los Países Bajos realiza un estudio sobre como integrar criterios para la compra verde. El método principal de la industria para evaluar el desempeño ambiental de un producto es el ACV. Gracias a la estandarización a través de la ISO 14040 [9] se ha convertido en un método transparente y fiable, referente por su base científica, pero que a la vez lo convierte en complejo y con una demanda alta de tiempo y conocimiento. Por ello, la distribuidora opta en este caso de estudio por simplificar el método, centrándose en los puntos más importantes y de mayor impacto, que permita su uso a todos los fabricantes y ser así capaz de integrar los criterios

ambientales junto con el resto de los criterios como el coste, el rendimiento y el cumplimiento de los requisitos técnicos.

La compra verde consiste en la adquisición de bienes y servicios que cumplen criterios ambientales, sociales y económicos, para reducir el impacto de las actividades comerciales y promover el desarrollo sostenible. Integrar criterios de compra verde es complejo, ya que para ello la empresa debe ser capaz de dar una ponderación a estos criterios frente a los aspectos más tradicionales mediante los que evalúa el producto. En el artículo *Liander* monetiza los criterios ambientales para compararlos con el resto de los criterios. Para ello, emplean el método de análisis de coste de ciclo de vida que otorga un valor económico a las cargas ambientales.

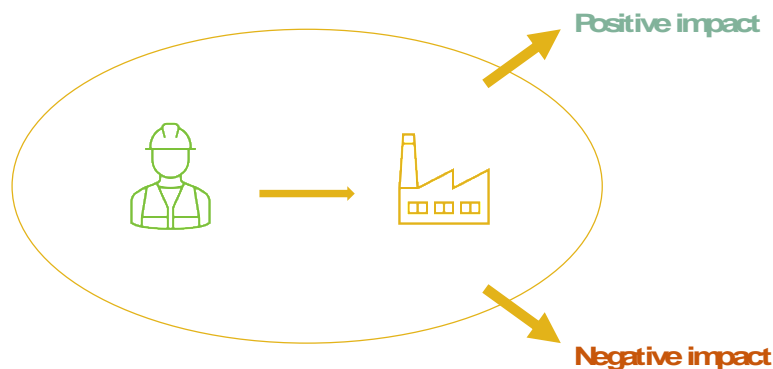


Figura 6: Esquema del proceso de compra verde.

Un ejemplo adicional de una empresa de distribución que utiliza la simplificación del ACV para una celda de media tensión y su integración en el proceso de compra es I-DE Redes Eléctricas Inteligentes S.A., perteneciente al grupo Iberdrola. El caso de estudio se detalla en el artículo “*A Simplified Tool For The Life Cycle Analysis Of A Medium Voltage Switchgear*” [17] donde se detalla como a partir de la realización de un ACV siguiendo el programa *PEP ecopassport* realizan una herramienta sencilla y fácilmente rellenable para todos los fabricantes que participan en su proceso de compra. La herramienta tiene en cuenta los principales aspectos de la celda de media tensión que generan un impacto ambiental que son los relacionados con la producción y las pérdidas del gas dieléctrico utilizado: SF₆.

Existe un claro interés por parte de las empresas distribuidoras en integrar criterios ambientales en sus procesos de compra. Los beneficios resultantes no solo mejoran la imagen de la empresa, sino que también pueden traducirse en una reducción de costes al disminuir la cantidad de materias primas utilizadas en la producción y la energía necesaria en los procesos de fabricación, así como en una mejora de la eficiencia y una reducción de los residuos generados. Además, la compra verde suele impulsar procesos de innovación y desarrollo para crear productos más sostenibles, lo que se traduce en una mejor salud y bienestar para las personas y el medio ambiente.

Otra forma interesante de aplicar el estudio del ACV es al nivel de la red de infraestructuras en su conjunto, lo que permitiría extender los beneficios mencionados a toda la infraestructura. La Universidad de Edimburgo ha llevado a cabo un ACV de la red de transmisión de Gran Bretaña, que se detalla en el artículo *“Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain”* [18]. A menudo, los planes para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero se centran en las plantas de generación, pero la infraestructura asociada también tiene una contribución significativa. En este estudio se evaluaron las emisiones de carbono del ciclo de vida de la red de transmisión en Gran Bretaña durante 40 años utilizando un mismo mix energético. Los resultados mostraron que la energía transmitida por la red fue 19 veces mayor que la utilizada para su construcción y operación. Las emisiones de carbono de la red provienen principalmente de las pérdidas de transmisión eléctrica y de las fugas de gas dieléctrico (SF₆). Si las decisiones de inversión en la red de transmisión permitieran un diseño más sostenible se podría equilibrar los mayores costes financieros y ambientales asociados a conductores más grandes y la reducción de las pérdidas de transmisión y emisiones de CO₂ durante la vida útil de la red.

2.3.1 ACV de un transformador

La evaluación del desempeño ambiental de los transformadores es de gran importancia, especialmente cuando se considera su papel fundamental en la red de distribución eléctrica. Esta evaluación tiene el potencial de generar beneficios significativos. Durante las últimas décadas, se ha llevado a cabo una investigación exhaustiva y estudios detallados sobre la evaluación ambiental de los transformadores.

A modo de ejemplo, en el 2009 y en el 2011 se presentaron en CIRED (International Conference on Electricity Distribution) los artículos *“Comparative Life Cycle Assessment of a MV/LV transformer with an amorphous metal core and a mv/lv transformer with a grain oriented magnetic silicon steel core”* [19] y *“Life Cycle Assessment of dry-type and oil-immersed distribution transformers with amorphous metal core”* [20], respectivamente. Estos artículos realizan un ACV sobre el transformador, presentando alternativas para reducir su impacto ambiental.

El primero de ellos, realiza un ACV de acuerdo con la ISO 14040 [9] de dos tipos de transformadores en función del material de su núcleo: metal amorfo y acero de alta permeabilidad orientado a granos, para comparar el desempeño ambiental de ambos. Para el estudio se define como unidad funcional un transformador de 15kV, 400V con una potencia máxima de 250kVA, considerando una vida útil de 30 años y con un análisis de “la cuna a la tumba”, es decir, desde su producción hasta la disposición final. Los resultados obtenidos indican que el transformador de núcleo de metal amorfo es la opción más sostenible. Aunque tienen mayores impactos en la fase de fabricación, se compensa con las menores pérdidas energéticas durante el uso.

El segundo artículo, enfoca el ACV como método para valorar si el empleo de un transformador más eficiente energéticamente realmente es una solución más sostenible, ya que los transformadores con menores pérdidas energéticas generalmente requieren de un mayor uso de materias primas,

lo cual genera un impacto directo en el medio ambiente. Disponer de una herramienta cómo el ACV es crucial, ya que te permite realmente valorar el desempeño ambiental de una solución específica durante toda la vida útil del producto y no solo considerando una única etapa.

Para ello, se realiza una comparación entre cuatro tipos de transformadores, los cuales se dividen en dos categorías según el tipo de refrigerante utilizado. Estas categorías son: transformadores con aceite, los cuales se subdividen en convencionales y con núcleo de metal amorfo, y transformadores secos, que también se subdividen en convencionales y EcoDry. Ambos transformadores no convencionales tienen mayor impacto asociado al proceso de fabricación frente a los convencionales, aunque este proceso del ciclo de vida solo representa entre el 2 y el 10% del impacto total. Por tanto, la reducción de las pérdidas que supone el 60% del impacto total, permite mejorar el desempeño ambiental en un 40 a 50%. Esto demuestra la importancia de la herramienta de ACV, debido a que sin su uso se podrían fomentar acciones que generan un impacto positivo directo, cómo la reducción de materias primas, pero que no alcanzan el resultado esperado.

Posteriormente se han realizado diversos estudios relacionados, entre los cuáles se destaca el artículo *“Sustainability assessment of novel transformer technologies in distribution grid applications”* [21] donde llevan a cabo un análisis de la sostenibilidad de cuatro tecnologías de transformadores disponibles actualmente en el mercado: LFT, LFT y OLTC, SST y HT. En el artículo se resalta el papel crucial que desempeñan los transformadores en la transición energética y cómo, en consecuencia, es necesario disponer de la capacidad para evaluar la sostenibilidad del transformador, junto con los requisitos más tradicionales como sus características, funcionamiento y fiabilidad.

Para la realización de este estudio utilizan una simulación de la red de distribución típica de Suiza, teniendo en cuenta el impacto que podría tener diferentes escenarios de generación, para ello obtienen los resultados para el mix eléctrico actual en Suiza, cumpliendo los objetivos de desarrollo sostenible para 2050 (*ES2050*) y si se alcanzan los objetivos de *Swissolar*, objetivos más ambiciosos de penetración de renovables. Además, el ACV que realizan incluye una simulación de cómo se comportaría cada uno de los transformadores ante una integración cada vez más superior de energías renovables. Las curvas de consumo-generación varían con la integración de renovables, frente a un mix eléctrico más tradicional, pudiendo aumentar las pérdidas energéticas de la red por variaciones de la tensión.

Los resultados del artículo indican que ante un mix eléctrico tradicional el transformador LFT es el que mejor desempeño ambiental tiene. Sin embargo, si se considera la funcionalidad del transformador para ampliar la capacidad de la red e integrar fuentes de energía renovable, es posible compensar su impacto ambiental negativo y mejorarlo. Por lo tanto, otros transformadores, como el transformador híbrido LFT y OLTC, podrían lograr un mejor desempeño ambiental en un mix eléctrico con una alta penetración de energías renovables, donde pueden surgir situaciones de congestión.

El objetivo del ACV es evaluar el impacto ambiental durante toda la vida útil de un producto en diferentes categorías de impacto definidas. Pero, el desarrollo de esta metodología es también relevante para identificar alternativas concretas del producto para mejorar una categoría ambiental específica. Actualmente, el cambio climático es una de las principales preocupaciones ambientales a nivel social y gubernamental. Por ello, la huella de carbono se encuentra en el centro de atención y supone un punto de riesgo reputacional para las compañías eléctricas, que contribuyen en “*un 40% a las emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (GEI)*” [22]. Por este motivo, el artículo “*The greenhouse gas emissions of power transformers based on life cycle analysis*” [22] que evalúa las emisiones de gases de efecto invernadero del transformador mediante el método de ACV, proporciona un interesante enfoque al centrarse únicamente en la huella de carbono del transformador.

Para el estudio se ha dividido el ciclo de vida del transformador en las siguientes etapas: adquisición de materias primas, ensamblaje, transporte, operación y fin de vida. Además, analizan la huella de carbono de dos tipos de transformadores, uno con una potencia de 50 MVA y tensión de 110 kV y otro de 240 MVA y 220 kV. Los resultados presentados muestran que la etapa con mayor impacto corresponde con la operación, por las pérdidas energéticas asociadas a un mix eléctrico con alta presencia de energías no renovables. Otro punto interesante, es la comparación entre ambos transformadores, presentan una distribución semejante de impactos en la fabricación ya que proporcionalmente los materiales empleados son parecidos. Sin embargo, durante la operación el transformador con mayor potencia conduce más electricidad, lo que resulta en mayores pérdidas, siendo los impactos asociados a esta superiores a lo esperado y sin una relación proporcional entre ambos transformadores, cómo ocurría con la etapa de fabricación.

Cómo se ha visto en los diferentes artículos, un importante aspecto a nivel ambiental es el refrigerante utilizado en el transformador, tanto por su influencia en la eficiencia durante la operación cómo por el carácter contaminante que puede tener. La evolución hacia productos cada vez más sostenibles ha hecho que los fabricantes busquen soluciones más amigables con el medio ambiente para sustituir el aceite usado en los transformadores como refrigerante. Un ejemplo de esto es el artículo “*Improvement of environmental characteristics of natural monoesters for use as insulating liquid in power Transformers*” [23] que evalúa diferentes mezclas de aceite para obtener una formulación óptima que cumpliera con las características funcionales exigidas como el punto de inflamación, valores de viscosidad, acidez... y a la vez, tuviera un alto nivel de biodegradabilidad para asegurar un funcionamiento seguro con el menor riesgo medioambiental.

En conclusión, la evaluación del desempeño ambiental de los transformadores es crucial debido a su importancia en la red eléctrica. En los últimos años, se han realizado diferentes estudios sobre el tema y presentado alternativas para reducir el impacto ambiental de los transformadores. El empleo del método de ACV ha permitido comparar diferentes tipos de transformadores y evaluar su sostenibilidad, lo que ha permitido demostrar que transformadores con menores pérdidas de energía tienen un mayor impacto ambiental en la fase de fabricación, pero que gracias a la reducción del impacto durante su uso se consigue disminuir el impacto total. Además, se ha

analizado el impacto ambiental de los transformadores en relación con la integración de energías renovables en la red eléctrica y demostrado que integrar las nuevas tecnologías en los transformadores supone una importante mejora en el desempeño ambiental. El refrigerante utilizado en los transformadores ha sido un factor importante que considerar, ya que puede tener influencia en la eficiencia operativa y contaminar durante la vida útil del transformador. Por lo tanto, los fabricantes cada vez emplean mezclas más biodegradables de aceite. El ACV ha sido una potente herramienta que permite encontrar los aspectos que mayor impacto ambiental tienen para ofrecer soluciones que cumplan con los requisitos funcionales, permitan un funcionamiento seguro y reduzcan el riesgo ambiental.

2.4 SOFTWARE EMPLEADO

La realización del ACV suele desarrollarse a través de alguno de los programas disponibles ya que estos softwares incluyen las principales bases de datos para las diferentes etapas de multitud de productos y para diferentes países. Algunos de los softwares disponibles son SimaPro, Open LCA, GaBi, Eco-it, Air.e LCA, TEAM y Umberto. Los resultados que se pueden obtener entre los diferentes softwares disponibles pueden variar y en función de la aplicación del ACV es importante escoger el programa más adecuado. En el artículo *“Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause-effect analysis of the problema”* [24] realizan una comparación del ACV de un producto en Brasil para dos modelados: de la cuna a la tumba y de la cuna a la puerta. Se obtuvieron los resultados de los impactos caracterizados y normalizados para cinco categorías de impacto, lo cual permite mostrar los diferentes resultados en función del software y la base de datos empleada.

El estudio comparativo entre los diferentes softwares disponibles ha sido una práctica habitual, en el artículo describen los más relevantes. Pero la tónica general es que SimaPro y GaBi son los programas más ampliamente utilizados en la industria. Esto se debe a que son los más completos, que ofrecen una mayor gestión de los datos, facilidad de análisis de los resultados y transparencia en los resultados.

En el presente trabajo se utilizará SimaPro, ya que además de ser un programa referente, es el empleado en la universidad. SimaPro es un software especializado en ACV desarrollado por la empresa holandesa PRé Consultants. [24]

3. EL ACV Y EL TRANSFORMADOR

La realización del ACV se basa en diferente normativa que define los aspectos más relevantes a considerar y la información mínima que el estudio debe contener. En la elaboración de este trabajo, se han tenido en cuenta las normas ISO [9; 10], las cuales no solo proporcionan directrices sobre cómo realizar un ACV, sino que también sirven como base para la elaboración del resto de normativa.

Además, se ha utilizado la Guía de Huella Ambiental [11] publicada por la Unión Europea como base para llevar a cabo un ACV de producto, garantizando así que todos los ACV a nivel europeo sean comparables.

En particular, se han empleado las Reglas de Categoría de Producto elaboradas por EPD Italia [25; 26] para determinar los límites y los aspectos más relevantes a considerar al realizar un ACV de un transformador de distribución para media tensión. La adopción de este conjunto de reglas específicas para el análisis del transformador garantiza la calidad adecuada de los resultados obtenidos en el ACV. Además, facilita la comparación y agregación de datos en estudios a mayor escala, y sienta las bases para la elaboración de una Declaración Ambiental de Producto (DAP).

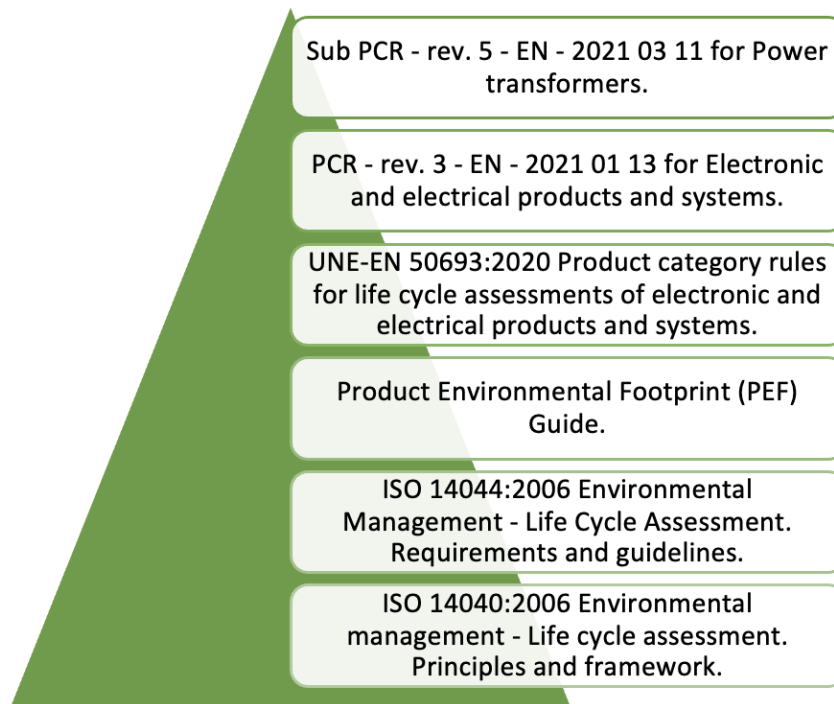


Figura 7: Resumen de las normas empleadas en el ACV del transformador.

A continuación, se presentan de manera resumida los aspectos más relevantes de cada una de las normas utilizadas en el presente estudio.

3.1 NORMAS ISO

Los principios y el marco de referencia del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se detallan en la Norma ISO 14040:2006 Principios y marco de referencia [9] y en la Norma ISO 14044:2006 Requisitos y directrices [10]. En esta normativa se divide la realización del ACV en cuatro etapas principales:

1. **Definición del objetivo y el alcance:** definir el objetivo implica determinar la aplicación que se le quiere dar al estudio, las razones de llevarlo a cabo y la audiencia objetivo, si se quieren utilizar los resultados para compararlo o para mostrarlos al público. Por otro lado, especificar el alcance implica determinar el producto que se va a estudiar, la unidad funcional, los límites del sistema a analizar, la metodología que se va a emplear y las suposiciones a realizar, entre otros.
2. **Realización del análisis del inventario:** se preparan y recogen los datos sobre las entradas y salidas de todas las fases del ciclo: fabricación, uso, tratamiento final y deposición. Durante esta etapa se validarán los puntos definidos en la anterior etapa y puede ser necesario una redefinición de la unidad funcional, los límites del sistema, etc.
3. **Evaluación del impacto ambiental:** a partir de las etapas anteriores se obtiene el impacto ambiental asociado a la unidad funcional definida. En esta etapa se presentan las categorías de impacto y los indicadores seleccionados, el modelo de caracterización y la relevancia del impacto. Como elementos opcionales se podrá presentar también el modelo de normalización y ponderación, para la representación conjunta de todas las categorías de impacto seleccionadas.
4. **Interpretación de los resultados:** finalmente se resumen los resultados para obtener conclusiones y recomendaciones en función del objetivo definido inicialmente.

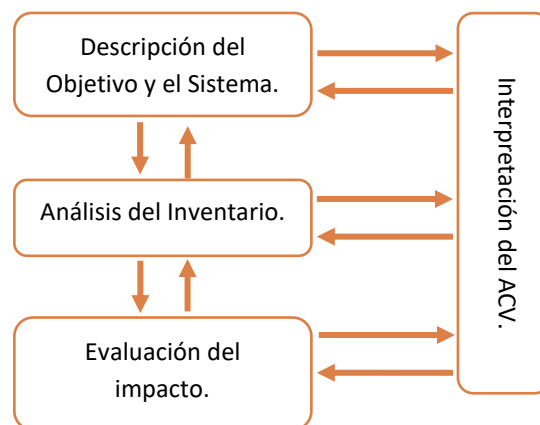


Figura 8: Etapas del ACV.

De acuerdo con la Norma ISO 14040:2006 Principios y marco de referencia [9], la realización de un ACV permite identificar las principales oportunidades de mejora del impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida, tomar decisiones respaldadas en información contrastada y seleccionar aquellos indicadores medioambientales más relevantes para la toma de medidas y la evaluación del desempeño. En esta Norma, la unidad funcional se define como la referencia de un sistema o producto que permite relacionar las entradas y salidas. Su definición es esencial para asegurar la comparabilidad del estudio y su utilidad en otros sistemas. La unidad funcional también determinará el flujo principal del proceso o sistema, siendo la base fundamental del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

En general, la evaluación del impacto ambiental se realiza de forma potencial y los resultados se presentan en función del método en los impactos seleccionados. La realización del ACV es un proceso iterativo que depende de una potente base de datos. Por ello, requiere de mejoras continuas y actualización de datos con el avance del conocimiento y la evolución de la tecnología.

3.2 GUÍA DE HUELLA AMBIENTAL DE PRODUCTO

La Unión Europea tiene un compromiso con el desarrollo sostenible, las políticas elaboradas en las últimas décadas tienen el objetivo de fomentar aquellas actividades que tengan un mejor impacto en el medioambiente. Inicialmente las políticas medioambientales se centraban en reducir fuentes de contaminación puntuales, como la emisión de una industria. Sin embargo, en 2003, el Consejo Europeo dio un paso adelante al introducir la Comunicación COM/2003/302 [27] sobre la Política Integrada de Productos (PPI). En la Comunicación se destaca la necesidad de añadir una dimensión del impacto total del ciclo de vida de un producto en la política medioambiental. Con esto, se establecen las condiciones marco para la mejora ambiental continua de los productos durante su ciclo de vida completo.

Tras esto, se publicó el Sistema Internacional de Datos del Ciclo de Vida de Referencia (ILCD) [28] y los métodos de Huella Ambiental Europea (EF). Mediante ambos, se pretende orientar y aportar estándares que proporcionen consistencia y garantía de calidad a la realización del ACV. La Huella Ambiental Europea (EF) está formada por la Huella Ambiental del Producto (PEF) [11] y la Huella Ambiental de la Organización (OEF), ambos métodos de realización del ACV y de su comunicación [29]. El objetivo de esta normativa es desarrollar un método común en toda la UE sobre cómo las empresas deben evaluar el impacto ambiental de los productos a lo largo de toda la vida útil. Gracias al marco que establece, es posible fortalecer el mercado europeo de alternativas verdes y garantizar que los impactos ambientales se evalúen de manera transparente para reducirlos. Convirtiéndose así el ACV en una palanca para guiar las decisiones hacia el desarrollo sostenible.

En la Guía sobre Huella Ambiental del Producto (PEF) se proporciona toda la información necesaria para la realización de un ACV. Para ello, se especifica en cada sección una descripción de cada fase del ACV con las consideraciones para tener en cuenta y ejemplos [11]. Además, se explica la

importancia de las Reglas de Categoría de Producto (PCR) que garantizan una replicabilidad y consistencia para ACVs de productos de la misma categoría. La elaboración de un estudio de PEF tendrán que realizarse preferentemente siguiendo una PCR.

Las principales diferencias que implementa la metodología PEF frente a la ISO 14040 y 14044 consisten en la implementación de mayores requisitos en cada una de las fases, para garantizar una calidad mínima. Para las normas ISO la definición de la unidad funcional sería correcta siempre que sea consistente con la definición del objetivo y el alcance del estudio, sea medible y el flujo principal quede definido. Mientras que para la Guía PEF la unidad funcional debe tener los siguientes contenidos mínimos, además de ser coherente con el objetivo y el alcance del estudio: la función proporcionada por el producto o servicio, la magnitud medible del producto o servicio, la vida útil del producto o servicio y la calidad esperada. También se debe especificar el flujo de referencia en relación con la unidad funcional, y las entradas y salidas utilizadas en el proceso deberán realizarse para este flujo de referencia. Respecto a la definición de los límites del sistema, en el caso de las normas ISO son resultado de un proceso iterativo, inicialmente se plantean los límites a partir de la definición del objetivo y el alcance, pero que se modifican tras los primeros resultados y análisis de sensibilidad. En el caso de la metodología PEF, los límites del sistema quedan ya definidos en las PCR y deben incluir todos los procesos asociados al flujo de referencia, el enfoque del ACV debe ser de *“la cuna a la tumba”* y los procesos considerados se dividen en principales y secundarios, en función de lo cual se obtendrán información directa o bases de datos o modelos genéricos. Para disminuir la complejidad de la realización de un ACV de un producto, las normas ISO permiten la regla *“cut-off”* que implica que aquellos procesos dentro del límite del sistema que tengan un porcentaje del impacto inferior a un valor mínimo respecto del total pueden ser excluidos. Mientras que siguiendo la Guía PEF esto no estará permitido si la PCR no lo indica. Respecto a los impactos ambientales siguiendo la metodología ISO, numerosos impactos ambientales pueden considerarse, mientras que la PEF indica que como mínimo deben considerarse 14 categorías de impacto si la PCR no indica otras categorías [11].

Por tanto, la metodología PEF no se limita a las normas ISO y establece requisitos más específicos y contenidos mínimos en cada fase del estudio. Aunque deja hueco para el estudio de un producto específico, permitiendo su adaptación y creación de normas propias para la realización del ACV.

3.3 PCR Y SUB-PCR REGLAS DE CATEGORÍA DE PRODUCTO

La realización de un ACV para un producto concreto se facilita si existen Reglas de Categoría de Producto (PCR) ya que en ellas se establecen requisitos más específicos que permiten definir de forma más precisa la unidad funcional, los límites del sistema, la calidad de los datos a emplear, entre otros. Para el presente estudio, se empleó la *“PCR - rev. 3 - EN - 2021 01 13 for Electronic and electrical products and systems”* [25] y la *“Sub PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers”* [26]. Ambas PCR se han desarrollad a través de EPD Italy, operador de Italia acreditado por Accredia, entidad acreditadora en Italia, para la validación de Declaraciones Ambientales de Producto (EPD)

y realización de PCR [30]. En lugar de utilizar estas PCR desarrolladas en Italia, se trató de utilizar una PCR de *PCR International AB* [31], que constituye la principal referencia a nivel internacional para este tipo de normativa. No obstante, la única PCR disponible para transformadores solo aplica para potencias superiores a 25MVA [32], que no coincide con el tipo de transformador en estudio.

Las dos PCR desarrolladas en Italia para aplicar a transformadores de la red de distribución se basan en la *“Norma Europea 50693:2019 Reglas de Categoría de Producto para el Análisis de Ciclo de Vida de productos y Sistemas Eléctricos y Electrónicos”* [33]. Esta norma fue elaborada por el Comité Técnico (TC) 111 de CENELEC en respuesta al creciente interés en los aspectos medioambientales de productos y sistemas eléctricos y electrónicos por parte de clientes y reguladores. La norma establece requisitos para desarrollar escenarios predeterminados, el contenido mínimo del informe del Análisis de Ciclo de Vida y el desarrollo de reglas específicas para productos.

La *“PCR Electronic and electrical products and systems”* [25] tiene un enfoque general, desarrollada con el objetivo de transponer la EN 50693:2019 [33] al entorno de Italia. Por este motivo, en muchos de los apartados se aplica directamente los requisitos recogidos en la Norma Europea. Aunque ambas normas, hacen referencia a una categoría amplia de productos. La elaboración de un ACV de un transformador para la red de distribución de media tensión a baja tensión requiere una PCR más específica. Por este motivo, se desarrolló la segunda norma, *“Sub PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers”* [26] que forma parte del Programa EPDItaly y se utiliza para preparar, evaluar y validar una Declaración Ambiental de Producto internacionalmente válida a través de la verificación oportuna del desempeño ambiental de productos en la categoría general "Productos y Sistemas Electrónicos y Eléctricos" y en la categoría específica de "Transformadores de Potencia".

La categoría de productos clasificada como "Transformadores de Potencia" incluye transformadores y autotransformadores trifásicos sumergidos en aceite naturalmente enfriado, con bajo nivel de pérdidas y ruido, con los siguientes parámetros de operación entre los cuales se encuentra el transformador analizado en este estudio:

Tabla 1: Parámetros de Operación de los Transformadores de Potencia de la “Sub-PCR EN 2021 03 11 for Power Transformers” [26].

Tipo de Transformador	Categoría de Tensión	Tensión Primaria Nominal	Potencia Nominal
Distribución	BT y MT	Hasta 36kV	50-3150kVA
Generación	MT y AT	A partir de 36kV	3-300MVA

4. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE DEL ACV

4.1 OBJETIVOS

Este proyecto tiene como objetivo principal el desarrollo de una herramienta simplificada de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para transformadores de media tensión usados en la red de distribución. La función de esta herramienta es de manera sencilla y rápida comparar medioambientalmente transformadores fabricados por diferentes proveedores. Mediante la comparación se podrá integrar en los procesos de compra criterios de desempeño ambiental en la adquisición de estos equipos.

Para ello, se implementarán diversas acciones que constituyen los objetivos secundarios del estudio. En primer lugar, el establecimiento de la base de referencia: se realizará un ACV de un transformador actual de media tensión para la red de distribución, que debe servir como modelo para el desarrollo del proyecto. Además, se realizará un ACV de un transformador del pasado (1980) y uno del futuro (2050), con la finalidad de conocer y comprender la evolución del transformador en sus diferentes etapas del ciclo de vida a lo largo de las últimas décadas, para identificar los impactos ambientales y las etapas más relevantes. Los diferentes ACVs realizados servirán de modelo para la elaboración de la herramienta. A través de la herramienta se compararán tres transformadores de diferentes fabricantes. Los resultados obtenidos para estos transformadores deberán ser comparables a los anteriores ACVs realizados.

La aplicación del estudio se limita al ámbito interno de una empresa de distribución. La información que se pretende extraer del estudio de ACV tiene como finalidad potenciar la toma de decisiones que reduzcan el impacto ambiental de la empresa. Por lo tanto, los resultados no serán empleados en un contexto externo para destacar el desempeño ambiental de los equipos, la audiencia objetivo será interna. En su lugar, se centrarán en guiar internamente las estrategias de mejora y enriquecer las consideraciones ecológicas de la empresa.

4.2 ALCANCE

En el siguiente apartado se definen las diferentes categorías que representan el alcance.

4.2.1 Unidad funcional

Para llevar a cabo el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del transformador en el marco de este trabajo se ha establecido la unidad funcional descrita en la “*Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [26]: un transformador con una potencia de 630 kVA, una tensión asignada primaria de 20 kV y una tensión máxima de 24 kV, con tensión secundaria en BT y una vida útil estimada de 35 años.

Según la legislación vigente, en las empresas de distribución se considera una vida útil genérica de 40 años para los transformadores en términos de retribución por inversión, operación y mantenimiento [34]. Sin embargo, en este estudio se ha considerado una vida útil de 35 años, que coincide con el periodo especificado en el PCR, con el objetivo de asegurar la comparabilidad entre diferentes EPD. Independientemente, desde la PCR se recomienda la especificación de la vida útil real en información del producto.

El ACV se realizará para un transformador adquirido por una empresa de distribución de España y cuya operación se realizará en la red de distribución del mismo país. Para el estudio de la etapa de Operación, se han definido dos niveles del índice de carga: al 40% y al 70% de la carga constante durante todas las horas del año. El índice de carga del 70% es el nivel indicado en la PCR, aunque en general, la red de distribución se encuentra trabajando a índices de carga inferiores. Por este motivo, se ha considerado importante analizar también los resultados obtenidos con este valor de carga inferior.

4.2.2 Límites del sistema

Conforme a la “*Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [26] se incluirán dentro del estudio todas las etapas del ciclo de vida del transformador, dotando al estudio de un enfoque de la *cuna hasta la tumba* (“*from cradle to grave*”). Entre las etapas a considerar se encuentran la extracción de materias primas, el ensamblaje del transformador, la distribución y puesta en servicio del transformador, la operación del transformador y el fin de vida.

Además, la PCR del transformador requiere que estas etapas se dividan en tres módulos principales: *Upstream*, *Core* y *Downstream*. Se presenta un esquema que describe cada uno de estos módulos, con sus respectivas etapas del ciclo de vida del transformador y las actividades principales de cada una de ellas. A continuación, se describe brevemente cada uno de los módulos:

- **Upstream (aguas arriba):** Este módulo recoge la extracción y procesamiento de materias primas, incluyendo la energía consumida en la fabricación y el transporte desde el proveedor hasta la fábrica en la que se ensamblará el transformador. Las materias primas de las que está compuesto el transformador son: acero de silicio, aluminio, papel aislante, tela de vidrio, acero, bases minerales, ésteres vegetales y resina. Dentro de este módulo se ha considerado también el proceso de trabajo del acero y el aluminio.
- **Core (núcleo):** Aquí se incluye el proceso de fabricación del transformador. Para ello, se tiene en cuenta la energía empleada en el ensamblaje del transformador, el transporte y la gestión de residuos generados en la fábrica.
- **Downstream (aguas abajo):** En este módulo se encuentran las etapas de distribución, uso y fin de vida. Para esta etapa se han considerado diferentes escenarios que se detallarán en el inventario análisis del inventario.

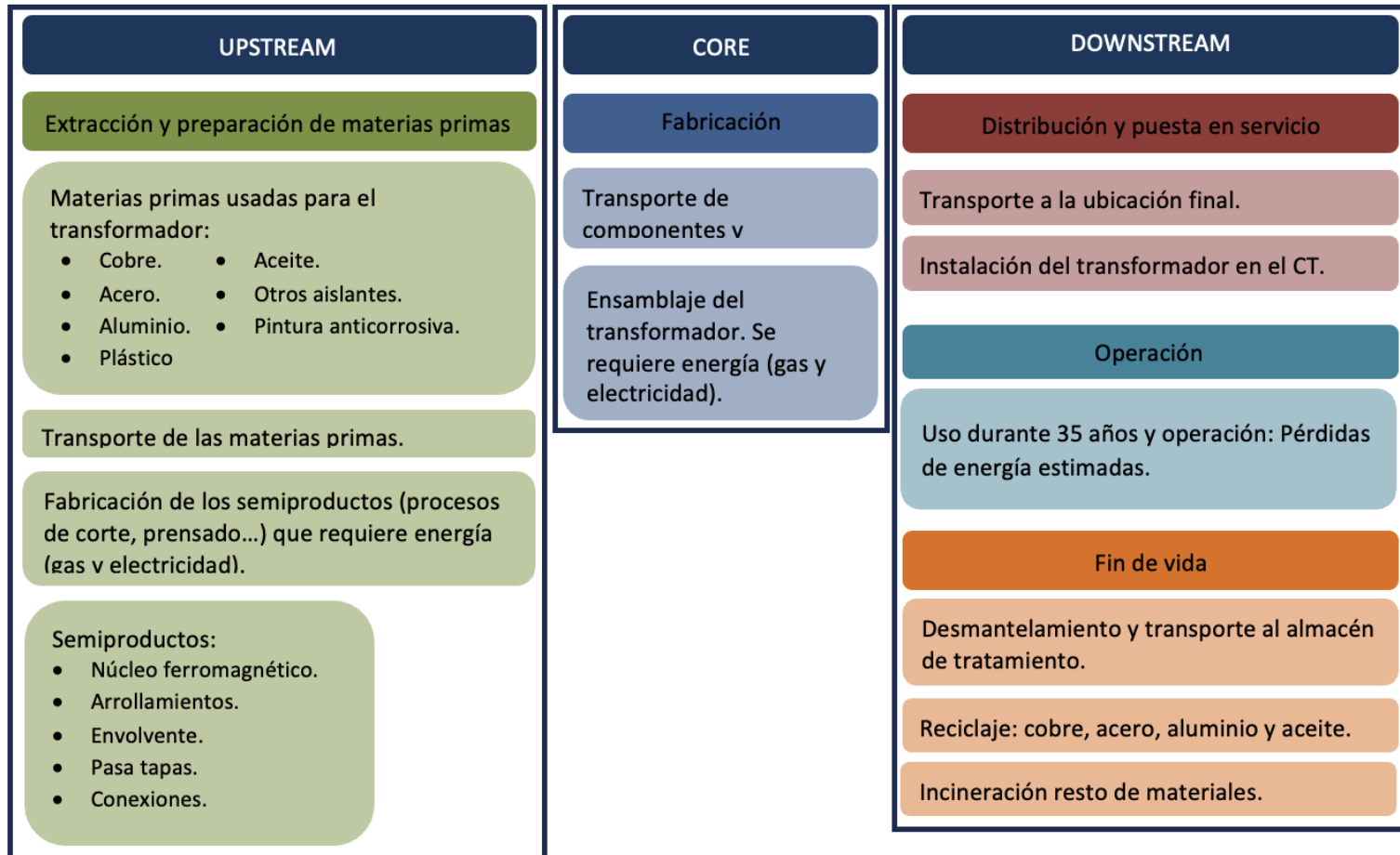


Figura 9: Módulos del ciclo de vida de un transformador de media tensión.

4.2.3 Base de datos:

El modelado se ha realizado con el software SimaPro, versión 9.3.0.3 [35]. El inventario del ciclo de vida se ha realizado a través de la base de datos Ecoinvent 3.8, principal base de datos reconocida a nivel europeo por su amplitud y calidad. Se ha escogido principalmente esta base de datos porque contiene los factores de caracterización para la localización de estudio y las diferentes tecnologías contempladas. La base de datos ecoinvent contiene más de 18,000 conjuntos de datos confiables de inventario de ciclo de vida, que abarca diferentes sectores como construcción, químicos y plásticos, energía, transporte, tratamientos de residuos y reciclaje, así como suministro de agua, entre otros sectores industriales. Además, cada actividad está vinculada a una ubicación geográfica. La amplitud geográfica en la base de datos depende de la calidad y disponibilidad de la información. Aunque la mayoría de las actividades incluyen datos a nivel global, en este proyecto se ha trabajado para utilizar preferentemente información de geografías más específicas, priorizando España y Europa, y en caso contrario, los datos globales [36].

Durante la recopilación de los datos, la Norma Europea 50693:2019 [33] indica que las reglas de corte a seguir establecen que como máximo el 5% del impacto ambiental total del sistema de productos analizado que puede ser excluido. Además, en la “*Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [26] se especifica con mayor detalle como “*Los materiales que componen el propio transformador, cuya masa total no excede el 1% del peso total del dispositivo*” pueden ser excluidos.

4.2.4 Categorías de impacto

De acuerdo con la “*Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [26] el informe del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) debe incluir la siguiente serie de indicadores de impacto ambiental, definidos en la Norma Europea 15804:2012+A2:2019 [37].

Tabla 2: Parámetros de impacto ambiental básicos de la EN 15804:2012+A2:2019 [37].

Categoría de impacto	Indicador de impacto	Unidad de medida	Modelo
Cambio climático – total	Potencial de calentamiento global (GWP-total).	kg CO ₂ eq.	Modelo base de 100 años IPCC basado en el IPCC 2013.
Cambio climático – fósil	Potencial de calentamiento global de los combustibles fósiles (GWP-fossil).	kg CO ₂ eq.	Modelo base de 100 años IPCC basado en el IPCC 2013.
Cambio climático – biogénico	Potencial de calentamiento global biogénico (GWP-biogenic).	kg CO ₂ eq.	Modelo base de 100 años IPCC basado en el IPCC 2013.
Cambio climático – uso del suelo y cambio del uso del suelo	Potencial de calentamiento global del uso del suelo y cambio el uso del suelo (GWP-luluc).	kg CO ₂ eq.	Modelo base de 100 años IPCC basado en el IPCC 2013.

Categoría de impacto	Indicador de impacto	Unidad de medida	Modelo
Agotamiento de la capa de ozono	Potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférico (ODP).	kg CFC 11 eq.	Régimen estable ODPs, WMO 2014.
Acidificación	Potencial de acidificación, excedente acumulado (AP).	Mol H eq.	Excedente acumulado, Seppala et al. 2006, Posch et al., 2008.
Eutrofización del agua	Potencial de eutrofización, fracción de nutrientes que alcanzan el compartimento final de agua dulce (EP-freshwater).	kg P eq.	Modelo EUTREND, Strujis et al., 2009b, según se implementa en ReCiPe.
Formación de ozono fotoquímico	Potencial de formación de ozono troposférico (POF).	kg MNVOC eq.	LOTOS-EUROS, Van Zelm et al., 2008, según se aplica en ReCiPe.
Agotamiento de los recursos abióticos – minerales y metales	Potencial de agotamiento de los recursos abióticos para los recursos no fósiles (ADP-minerals&metals).	kg Sb eq.	CML 2002, Guinée et al., 2002, y Van Oers et al., 2016.
Agotamiento de recursos abióticos – combustibles fósiles	Potencia de agotamiento de recursos abióticos para los recursos fósiles (ADP-fossil).	MJ, valor calorífico neto.	CML 2002, Guinée et al., 2002, y Van Oers et al., 2016.
Consumo de agua	Potencia de privación de agua (usuario), consumo de privación ponderada de agua (WDP).	m ³ mundial eq. Privada.	Disponibilidad de agua restante (AWARE) Boulay et al., 2016.

El ACV usado como base de referencia se ha realizado teniendo en cuenta todos estos impactos, no obstante, para facilitar el análisis y la comprensión de los resultados, la representación gráfica se reducirá a aquellas categorías de impacto más relevantes. La herramienta simplificada para la integración de criterios de compra verde también tendrá un menor número de impactos, reduciéndose a aquellos más relevantes.

El cálculo de los resultados en SimaPro se ha realizado siguiendo la revisión de la Norma Europea 15804 + A2 de 2019 [37]. Esta metodología se alinea con el método de Huella Medioambiental EF 3.0, excepto en su enfoque sobre el carbono biogénico. Según la norma EN 15804, las emisiones de carbono biogénico generan el mismo impacto en el Cambio Climático que el carbono fósil, pero pueden neutralizarse al retirar este carbono de la atmósfera nuevamente. Es importante tener en cuenta que esta implementación del método se adaptó para concordar con las sustancias presentes en las bibliotecas de datos de SimaPro, y aunque es muy similar al método EF 3.0, presenta algunas diferencias en los factores de caracterización en las categorías de Cambio Climático y Cambio Climático – Biogénico [38].

4.2.5 Normalización y pesos de los factores

Para representar de manera integral todos los impactos ambientales es necesario normalizar y ponderar los resultados. Si no se realiza este proceso, los indicadores ambientales carecerán de comparabilidad entre sí. Aunque no se considera un paso obligatorio en la elaboración de una Declaración Ambiental de Producto (DAP), sí constituye un análisis sumamente enriquecedor en el contexto de este estudio. Comprender cuáles son las categorías de impacto más influyentes y cómo evolucionan con el tiempo en relación con el conjunto, posibilita la evaluación de qué criterios merece la pena incorporar en los procesos de compra verde.

Para normalizar se utilizaron los valores del método EF 3.0 publicados en noviembre de 2019. Cabe destacar que la implementación de este método en SimaPro ha sido adaptada para ajustarse mejor a las sustancias utilizadas en las bibliotecas de datos de SimaPro [38]. De acuerdo con el artículo científico *“Global environmental impacts: data sources and methodological choices for calculating normalization factors for LCA”* [39] estos valores se han construido a partir de una recopilación de bases de datos sobre emisiones y recursos de 2010, utilizando los indicadores de Sistema Internacional de Datos de Ciclo de Vida de Referencia (ILCD) [40] y EF de la UE. Los factores de ponderación empleados son también los obtenidos a partir del método EF 3.0, adaptados por SimaPro para ajustarse a su base de datos [38]. A continuación, se representan los valores utilizados en SimaPro para las categorías de impacto analizadas:

Tabla 3: Factores de normalización y ponderación para las categorías de impacto utilizadas del método EF 3.0 [38].

Categoría de impacto	Normalización	Ponderación
Cambio climático – total (GWP)	0,0001235	0,2106
Agotamiento de la capa de ozono (ODP)	18,64	0,0631
Acidificación (AC)	0,018	0,062
Eutrofización del agua (EP-freshwater).	0,6223	0,028
Formación de ozono fotoquímico (POF)	0,02463	0,0478
Agotamiento de los recursos abióticos – minerales y metales (ADP-minerals&metals)	15,71	0,0755
Agotamiento de recursos abióticos – combustibles fósiles (ADP-fossil)	0,00001538	0,0832
Consumo de agua (WDP)	0,00001538	0,0851

El cálculo de estos factores de ponderación se desarrolla en el informe técnico *“Development of a weighting approach for the Environmental Footprint”* [41]. El objetivo del JRC es desarrollar un método para ponderar las categorías de impacto de la EF basado en los problemas ambientales. Para definir los factores de ponderación más adecuados, se consideraron diferentes enfoques: ítem único, distancia al objetivo, basado en paneles, valoración monetaria y metamodelos. Tras realizar un análisis detallado de cada uno de estos métodos, proponen en el informe dos conjuntos de factores de ponderación considerando los impactos relacionados con la toxicidad y excluyendo estos impactos. SimaPro utiliza valores de ponderación que incluyen las categorías de impacto relacionadas con la toxicidad. Según el documento del JRC, la solidez de estas categorías de impacto

es baja y, por lo tanto, puede ser aconsejable excluirlos al estudiar el rendimiento ambiental. Añadiendo que la PCR de los transformadores no incluye las categorías de impacto asociadas a la toxicidad como categorías de impacto relevantes para el ACV de un transformador de potencia para la red de distribución, se ha considerado que para este estudio era preferible utilizar los factores de ponderación que excluyen las categorías de impacto relacionadas con la toxicidad.

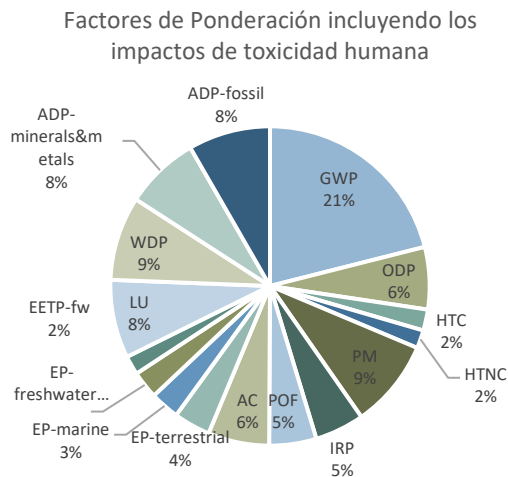


Figura 10: Factores de ponderación de acuerdo con la metodología EF 3.0 incluyendo los impactos de toxicidad humana [41].

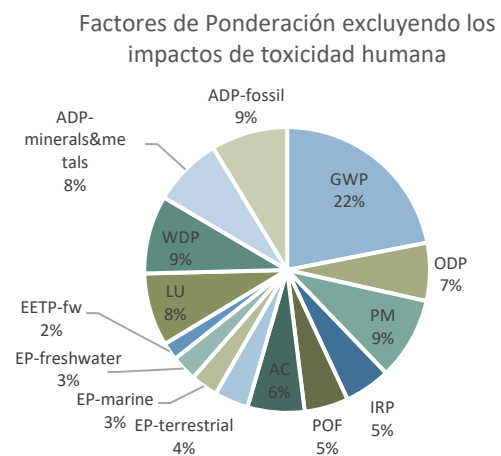


Figura 11: Factores de ponderación de acuerdo con la metodología EF 3.0 excluyendo los impactos de toxicidad humana [41].

Esta representación de los factores de ponderación incluye más categorías de impacto que las establecidas como obligatorias en la "Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers" [26]. Debido a esto, en la herramienta de compra verde, donde solo se mostrarán las categorías de impacto obligatorias, se utilizarán estos factores de ponderación proporcionales para dichas categorías. Se representa la distribución:

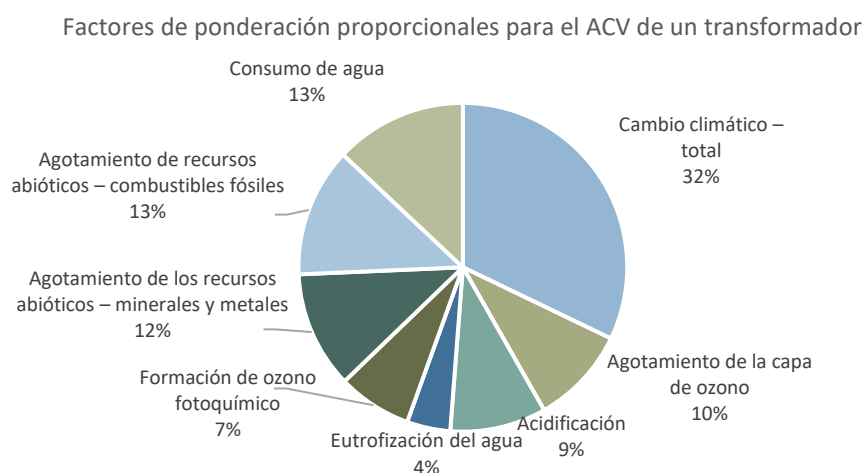


Figura 12: Factores de ponderación proporcionales para el ACV del transformador con el método EF 3.0 [41].

5. ANÁLISIS DEL INVENTARIO

A continuación, se abordará individualmente el análisis del inventario de cada uno de los módulos descritos anteriormente: upstream, core y downstream. Para cada uno de ellos se detalla la recogida de datos, los escenarios considerados y los cálculos realizados.

5.1 UPSTREAM Y CORE

Dentro de estos módulos se encuentran la etapa de fabricación del transformador que engloba la extracción de materias primas, la preparación de los componentes y el ensamblaje del transformador.

Los datos utilizados en cada uno de los procesos para el modelado del ACV del transformador actual (base de referencia) se han obtenido a partir de mediciones realizadas por el fabricante durante el año 2021. Para la obtención de los datos sobre las materias primas necesarias los fabricantes no han realizado asignación de carga para los productos y coproductos. No obstante, si lo han hecho para el consumo de materiales secundarios y el consumo energético, así como el mantenimiento de las instalaciones y las máquinas utilizadas.

Además, se ha analizado también el ACV de transformadores de la década de 1970-1980 y de 2050. La obtención de las materias primas utilizadas en la fabricación durante 1970-1980 de estos transformadores ha sido compleja. Por ello, a partir de las fichas técnicas en las que se indica las materias primas principales y el peso total, se ha estimado un reparto semejante al de los transformadores actuales para el resto de las materias primas no definidas como la resina, el acero inoxidable o la pintura.



GENERAL ELECTRIC
ESPAÑOLA

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 50Hz REFRIG. NATURAL EN ACEITE

TIPO	RECON. UNEFA	ALTA TENSION			
		GRUPO	PROCESO	TENSION	POTENCIA
	52.02-A	1	1	21000	
		2	2	20500	
		3	3	20000	2240 650
		4	4	19500	
		5	5	19000	
		6	6		
		7	7		
		8	8		
		9	9		
		10	10		
		11	11		
		12	12		
		13	13		
		14	14		
		15	15		
		16	16		
		17	17		
		18	18		
		19	19		
		20	20		
		21	21		
		22	22		
		23	23		
		24	24		
		25	25		
		26	26		
		27	27		
		28	28		
		29	29		
		30	30		
		31	31		
		32	32		
		33	33		
		34	34		
		35	35		
		36	36		
		37	37		
		38	38		
		39	39		
		40	40		
		41	41		
		42	42		
		43	43		
		44	44		
		45	45		
		46	46		
		47	47		
		48	48		
		49	49		
		50	50		
		51	51		
		52	52		
		53	53		
		54	54		
		55	55		
		56	56		
		57	57		
		58	58		
		59	59		
		60	60		
		61	61		
		62	62		
		63	63		
		64	64		
		65	65		
		66	66		
		67	67		
		68	68		
		69	69		
		70	70		
		71	71		
		72	72		
		73	73		
		74	74		
		75	75		
		76	76		
		77	77		
		78	78		
		79	79		
		80	80		
		81	81		
		82	82		
		83	83		
		84	84		
		85	85		
		86	86		
		87	87		
		88	88		
		89	89		
		90	90		
		91	91		
		92	92		
		93	93		
		94	94		
		95	95		
		96	96		
		97	97		
		98	98		
		99	99		
		100	100		

BAJA TENSION

Figura 13: Placa de características de un transformador de 1970-1980.

Por otro lado, se ha utilizado un reparto igual de materias primas para el caso de los transformadores de 2050 que para el transformador base de 2022. Aunque se ha considerado que el 50% de estos materiales son reciclados, un 20% reutilizados y un 30% provienen de materias primas extraídas de la naturaleza. El ecodiseño tiene como objetivo fomentar la economía circular. Por tanto, es probable que los esfuerzos de mejora del transformador se enfoquen en facilitar su desmontaje al final de su vida útil, con el propósito de reutilizar una parte significativa de los materiales de manera directa.

Además, para comprobar la herramienta simplificada y evaluar la integración de criterios de compra verde, se compararán los transformadores de dos fabricantes más con el modelo usado de referencia. La recogida de los datos de estos fabricantes ha sido semejante a la del modelo de referencia, a partir de los datos presentados por los fabricantes.

El proceso de fabricación del transformador se compone de diferentes etapas. En primer lugar, se reciben y almacenan todas las materias primas necesarias para fabricar los subcomponentes del transformador hasta que estén todas disponibles en el almacén.

Por un lado, se corta y prepara la chapa para ir formando todos los subcomponentes. Se enrollan los devanados de alta y baja tensión para posteriormente unirlos. Las bobinas se construyen a partir de capas y papel aislante. Con las piezas de chapa preparadas y las bobinas enrolladas, se ensamblan, colocando el núcleo en el centro. Estos componentes junto con el resto de los accesorios añadidos quedarán dentro de la cubierta. A continuación, se realiza un proceso de calentamiento de la parte activa del papel y tras esto, se coloca el transformador en una campana de vacío hasta que alcanza la presión de vacío para introducir el aceite dieléctrico. Por otro lado, el tanque se suelda para hacerlo completamente estanco, una vez finalizada la soldadura se pinta y seca en el horno. Se realizan también diferentes comprobaciones para verificar que el tanque es completamente estanco.

Durante el proceso de fabricación se generan diferentes consumos de energía y transporte de los subcomponentes y componentes entre las diferentes plantas de fabricación hasta su ensamblaje final. Los fabricantes suelen disponer de instalaciones de autoconsumo que reducen su consumo energético y mejora los impactos asociados a la fabricación. En la elaboración de la herramienta, en caso de que el fabricante disponga de una instalación de autoconsumo, se reducirá el consumo de electricidad asociado, manteniendo el factor de caracterización calculado para el consumo eléctrico para la red de España para el consumo eléctrico restante. Para los ACV del transformador de 1980 y 2050 no se ha tenido en cuenta la posibilidad de que los fabricantes tengan instalaciones de autoconsumo. Aunque en 2050 es muy probable que todas las plantas de fabricación dispongan de generación fotovoltaica para autoconsumo, el factor de caracterización calculado para el mix de generación considerado ya incorpora un porcentaje elevado de fotovoltaica, por lo que para simplificar su cálculo no se ha tenido en cuenta, evitando posibles redundancias.

En el proceso de fabricación se generan diferentes residuos tras los procesos de preparación de la chapa de acero y aluminio, y también del papel aislante y el resto de los componentes. Se ha considerado que todos estos residuos se gestionan y se manda a un punto de reciclaje, donde la chatarra se procesa y los restos se desechan. De la pintura se generan un conjunto de residuos peligrosos que se gestionan dentro de la planta de fabricación, junto con el resto de los residuos semejantes asociados a otros procesos de fabricación.

Las principales materias primas de las que se compone el transformador son: silicio, aluminio, papel aislante, acero, aluminio, aceites y resinas. Se presenta a continuación un resumen del conjunto de materias primas usadas en el modelado de los ACV del transformador.

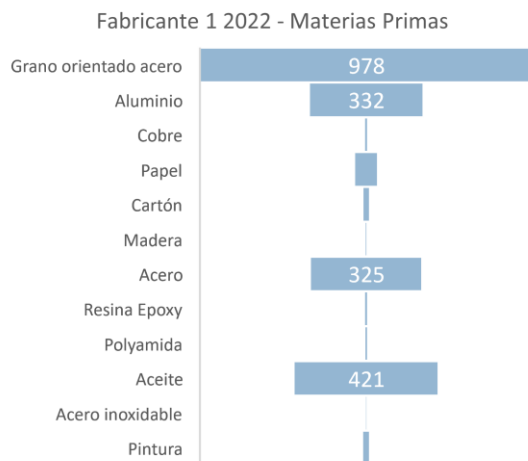


Figura 14: Materias primas (kg) del fabricante número 1 para el transformador de 2022.

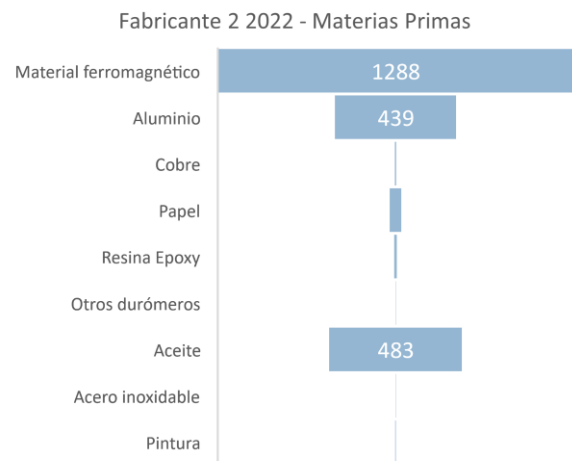


Figura 15: Materias primas (kg) del fabricante número 2 para el transformador de 2022.

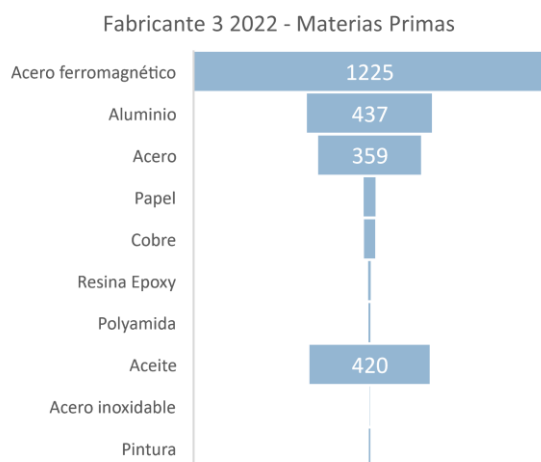


Figura 16: Materias primas (kg) del fabricante número 3 para el transformador de 2022.

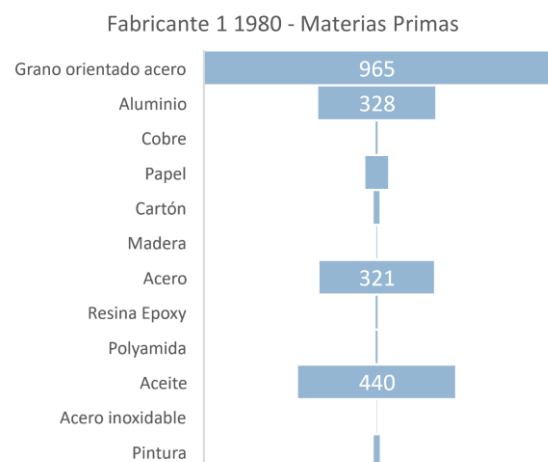


Figura 17: Materias primas (kg) del fabricante número 1 para el transformador de 1980.

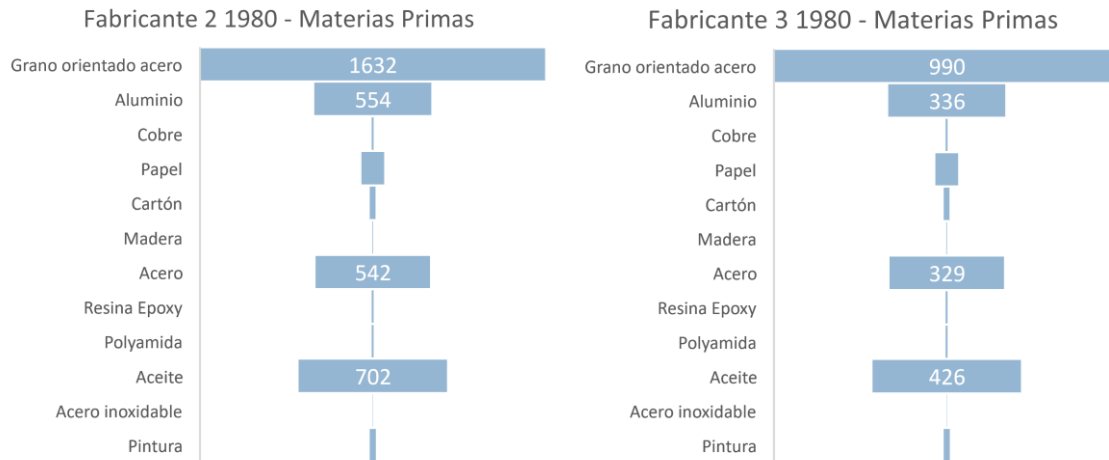


Figura 18: Materias primas (kg) del fabricante número 2 para el transformador de 1980.

Figura 19: Materias primas (kg) del fabricante número 3 para el transformador de 1980.

5.2 DOWNSTREAM

El proceso de *downstream* es el más completo, incluye las etapas del ciclo de vida de distribución, operación y fin de vida. Hasta la fecha, la etapa con mayor potencial de reducción correspondía con la operación. La vida útil de los transformadores es elevada y se encuentran en funcionamiento todas las horas del año, por tanto, la reducción de estas pérdidas implica importantes mejoras en el desempeño medioambiental.

A continuación, se detallan cada una de las etapas y las consideraciones realizadas para la elaboración de los ACV y la herramienta simplificada.

5.2.1 Downstream – distribución y puesta en servicio

La fase de distribución es compleja, ya que el público objetivo de este estudio son los distribuidores. Por tanto, tras la fabricación del transformador, la distancia de transporte hasta su ubicación final puede variar en función del lugar en la red en el que se vaya a instalar. La “*Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [26] indica que en caso de disponer de los datos primarios asociados a la distribución es preferible utilizarlos. En caso contrario, se puede adoptar uno de los dos escenarios que proponen para Italia:

- Mercado Europeo: 1,500 km, 100% cubierto por camión.
- Mercado No Europeo: 15,000 km, 95% cubierto por barco, 5% cubierto por camión.

En este estudio se ha considerado una distancia media de 400km por tierra, considerando que la mayoría de los centros de distribución de los fabricantes se ubican en Madrid y la distancia máxima a recorrer será 400km. Además, esta misma distancia se ha empleada en el desarrollo de otras

herramientas para otros componentes eléctricos. Para la realización del inventario de este transporte se ha calculado utilizando camiones de la base de datos Ecoinvent 3.8, EURO 5.



Figura 20: Distancia media de distribución para España. Elaboración con Google Earth.

5.2.2 Downstream – Operación

En el módulo de operación se incluyen los impactos relacionados con la energía consumida por el transformador durante la vida útil definida en la que el equipo estará en servicio. La “*Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [26] incluye también procesos de mantenimiento y operación. Estos procesos no se han considerado ya que el diseño de este tipo de transformadores no requiere ninguna acción periódica de mantenimiento, siempre que no se produzca un fallo. Pero, dado que en caso de que se produjera un fallo, sería un evento ocasional y aleatorio, no se considera en el ACV. Por tanto, la fase de operación está compuesta exclusivamente por la energía consumida por el transformador durante su uso.

Esta energía a parte de las pérdidas puede incluir algún consumo asociado, como en el caso de transformadores con refrigeración forzada. No obstante, los transformadores utilizados para este estudio no utilizan consumos auxiliares para refrigeración o digitalización. Por tanto, los consumos energéticos asociados a estas etapas se corresponden únicamente con las pérdidas energéticas que se produzcan.

En la “*Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [26] se define como debería realizarse el cálculo de estas pérdidas que sigue lo definido en la UNE-EN 60076-1 [42], la cual diferencia dos tipos de pérdidas:

- **Pérdidas en carga:** causadas por la impedancia del devanado y que dependen de la carga del transformador. Se calcularán a frecuencia y temperatura nominal.

- **Pérdidas en vacío:** representa la potencia activa absorbida por el transformador cuando la máquina está energizada y el circuito secundario está abierto. Es independiente de la carga del transformador.

De acuerdo con la “Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers” [26] energía total consumida (E_d) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E_d[kWh] = [P_{load} * k_{load}^2 + P_{no load}] * t_{year} * RSL + P_{aux} * f_{aux} * t_{year} * RSL \quad 1$$

Donde:

- P_{load} son las pérdidas de carga del transformador.
- k_{load} es el índice de carga medio del transformador.
- $P_{no load}$ son las pérdidas de vacío del transformador.
- P_{aux} son las pérdidas asociadas a consumos auxiliares.
- f_{aux} es la fracción de tiempo en el que los servicios auxiliares se encuentran funcionando.
- t_{year} es el número total de horas en las que el equipo estará funcionando.
- RSL es el tiempo de referencia de servicio, que para este estudio serán 35 años.

Para el estudio se han contemplado dos escenarios: un índice de carga de 40% y 70%. La “Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers” [26] indica que para cálculos recogidos dentro de la PCR se deberá considerar un índice de carga del 70%. No obstante, el índice de carga medio de muchos transformadores se encuentra en torno al 40%. Por este motivo, se ha realizado el estudio para ambos escenarios.

Para los transformadores fabricados en 1980 y 2022 se han utilizado las pérdidas energéticas estándar. En el caso del transformador de 2050 se ha simulado que las pérdidas energéticas mejoran en un 10% con respecto a las pérdidas actuales de los transformadores. La reducción de las pérdidas entre 1980 y 2022 ha sido significativa, por lo que se espera un menor potencial de reducción de las pérdidas frente a 2050.

Se presenta a continuación una tabla resumen de los resultados obtenidos para cada transformador.

Tabla 4: Operación del transformador de 1970-1980.

VARIABLES	UNIDAD	VALOR	VARIABLES	UNIDAD	VALOR
Potencia trafo	kW	630	Potencia trafo	kW	630
Energía RSL años	kWh*RSL	135.210.600	Energía RSL años	kWh*RSL	77.263.200
Pérdidas RSL años	kWh*RSL	1.656.345	Pérdidas RSL años	kWh*RSL	819.603
Energía 1 año	kWh	3.863.160	Energía 1 año	kWh	2.207.520
Pérdidas 1 año	kWh	47.324	Pérdidas 1 año	kWh	23.417
Rendimiento	-	0,987750	Rendimiento	-	0,989392
Rendimiento '	-	0,012250	Rendimiento '	-	0,010608
Pérdidas load	kWh	35498,148	Pérdidas load	kWh	11591,232
Pérdidas no load	kWh	11826	Pérdidas no load	kWh	11826
Pérdidas aux	kWh	0	Pérdidas aux	kWh	0
Pload	kW	8,27	Pload	kW	8,27
kload	-	0,7	kload	-	0,4
Pnoload	kW	1,35	Pnoload	kW	1,35
Paux	kW	0	Paux	kW	0
faux	-	0	faux	-	0
tyear	h	8760	tyear	h	8760
RSL	year	35	RSL	year	35

Tabla 5: Operación del transformador 2022.

VARIABLES	UNIDAD	VALOR	VARIABLES	UNIDAD	VALOR
Potencia trafo	kW	630	Potencia trafo	kW	630
Energía RSL años	kWh*RSL	135.210.600	Energía RSL años	kWh*RSL	77.263.200
Pérdidas RSL años	kWh*RSL	856.640	Pérdidas RSL años	kWh*RSL	391.222
Energía 1 año	kWh	3.863.160	Energía 1 año	kWh	2.207.520
Pérdidas 1 año	kWh	24.475	Pérdidas 1 año	kWh	11.178
Rendimiento	-	0,993664	Rendimiento	-	0,994937
Rendimiento '	-	0,006336	Rendimiento '	-	0,005063
Pérdidas load	kWh	19745,04	Pérdidas load	kWh	6447,36
Pérdidas no load	kWh	4730,4	Pérdidas no load	kWh	4730,4
Pérdidas aux	kWh	0	Pérdidas aux	kWh	0
Pload	kW	4,6	Pload	kW	4,6
kload	-	0,7	kload	-	0,4
Pnoload	kW	0,54	Pnoload	kW	0,54
Paux	kW	0	Paux	kW	0
faux	-	0	faux	-	0
tyear	h	8760	tyear	h	8760
RSL	year	35	RSL	year	35

Tabla 6: Operación del transformador de 2050.

VARIABLES	UNIDAD	VALOR	VARIABLES	UNIDAD	VALOR
Potencia trafo	kW	630	Potencia trafo	kW	630
Energía RSL años	kWh*RSL	135.210.600	Energía RSL años	kWh*RSL	77.263.200
Pérdidas RSL años	kWh*RSL	770.976	Pérdidas RSL años	kWh*RSL	352.099
Energía 1 año	kWh	3.863.160	Energía 1 año	kWh	2.207.520
Pérdidas 1 año	kWh	22.028	Pérdidas 1 año	kWh	10.060
Rendimiento	-	0,994298	Rendimiento	-	0,995443
Rendimiento '	-	0,005702	Rendimiento '	-	0,004557
Pérdidas load	kWh	17770,536	Pérdidas load	kWh	5802,624
Pérdidas no load	kWh	4257,36	Pérdidas no load	kWh	4257,36
Pérdidas aux	kWh	0	Pérdidas aux	kWh	0
Pload	kW	4,14	Pload	kW	4,14
kload	-	0,7	kload	-	0,4
Pnoload	kW	0,486	Pnoload	kW	0,486
Paux	kW	0	Paux	kW	0
faux	-	0	faux	-	0
tyear	h	8760	tyear	h	8760
RSL	year	35	RSL	year	35

La localización del estudio es España, por lo que el impacto asociado a las pérdidas de los transformadores dependerá del impacto ambiental del mix de generación en cada momento. Se presentan a continuación cada uno de los mixes considerados.

Para el caso base (2022), se han obtenido los datos de la página web de REE donde se publica los datos de generación de cada año [43]. Se han extraído los datos de generación para el año 2022 y se han importado a SimaPro.

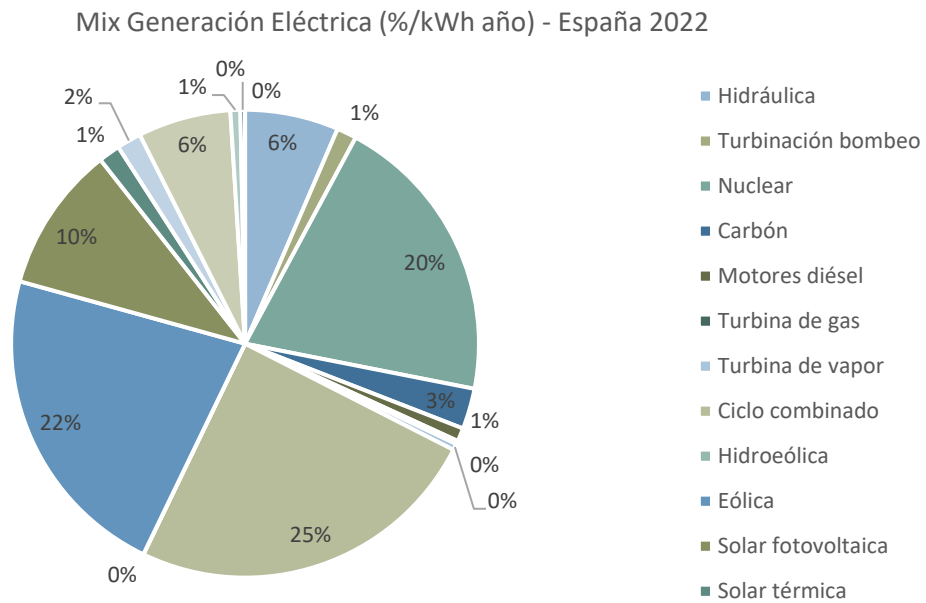


Figura 21: Mix de generación eléctrica para España 2022.

El mix energético de España en 1980 se ha obtenido a partir de Memoria Estadística Eléctrica de UNESA 1986 [44].

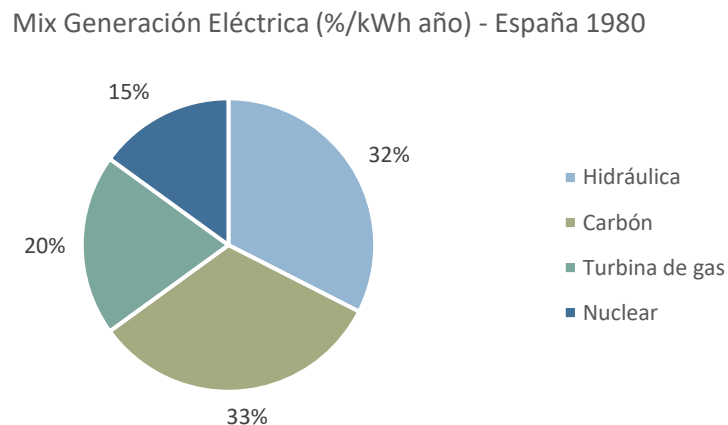


Figura 22: Mix de generación eléctrica para España 2022.

Por último, el mix de generación de 2050 se ha obtenido mediante una combinación de las políticas energéticas establecidas en el PNIEC [6] y la previsión realizada por la Agencia Internacional de la Energía en su documento “*Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*” [45]. En el PNIEC se indica el objetivo de potencia instalada en España para cada tecnología de generación. Pero para calcular las pérdidas se requiere la energía vertida por hora, por este motivo se combina las previsiones mundiales de generación de energía de cada tecnología publicadas por la Agencia Internacional de la Energía (AIE) en su informe. Se representa a continuación el escenario de generación eléctrica utilizado para el transformador de 2050:

Mix Generación Eléctrica (%/kWh año) - España 2050

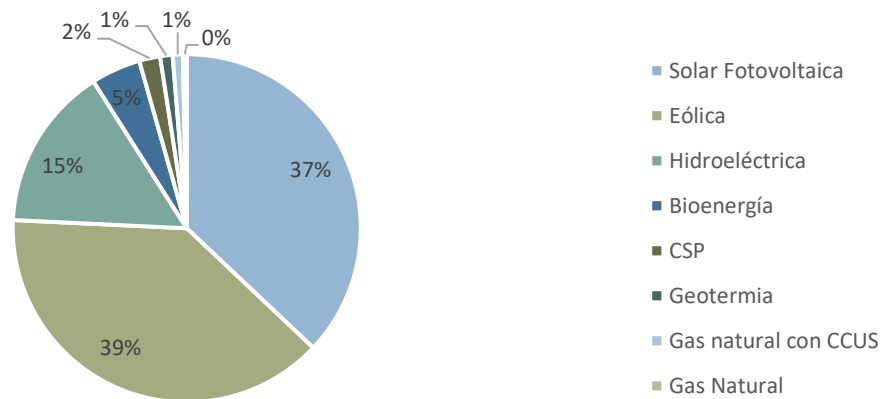


Figura 23: Mix de generación eléctrica para España 2022.

En la elaboración de la herramienta se ha utilizado el mix de generación de 2022. En caso de utilizar la herramienta para otros años, junto con el resto de los factores de caracterización, sería necesario actualizar este factor para un mix más reciente.

5.2.3 Downstream – Fin de vida

El proceso de fin de vida engloba el conjunto de acciones asociadas al desmantelamiento del transformador una vez finalizada su vida útil. De acuerdo con la “*Sub-PCR - rev. 5 - EN - 2021 03 11 for Power Transformers*” [26] en esta etapa del ciclo de vida del transformador deben evaluarse las siguientes operaciones:

- Transporte del transformador al lugar de recogida.
- Operaciones de desmontaje del producto.
- Distribución de los materiales para su reciclaje, incineración o vertido.

Por tanto, el estudio se ha considerado que el transporte del transformador al gestor de residuos tiene una distancia media de 100 km. Además, el SimaPro se ha calculado el transporte utilizando camiones de la base de datos Ecoinvent 3.8, EURO 5.

En cuanto al final de vida de los materiales, se han contemplado tres opciones: reciclaje, incineración y vertido. Para diferenciar el tratamiento final de cada uno de los materiales se ha obtenido información del Instituto Nacional de Estadística (INE) sobre el porcentaje de cada tipo material que se somete a cada proceso de fin de vida. Para el ACV del transformador de 2022 se han utilizado los datos disponibles para este año [46].

Tabla 7: Tratamiento de los residuos extraído del INE para el año 2022 [46].

Residuo	Tratamiento (%)		
	Reciclaje	Vertedero	Incineración
Residuos metálicos	99,63%	0,31%	0,06%
Residuos cobre	99,63%	0,31%	0,06%
Residuos aceite	99,23%	0,55%	0,22%
Residuos químicos	77,78%	11,07%	11,14%
Residuos madera	87,49%	3,36%	9,15%

Para el ACV del transformador de 1980 no había datos almacenados sobre la gestión de residuos por lo que se ha utilizado los últimos datos disponibles en el INE correspondientes al año 2002 [46].

Tabla 8: Tratamiento de los residuos extraído del INE para el año 2022 [46].

Residuo	Tratamiento (%)		
	Reciclaje	Vertedero	Incineración
Residuos metálicos	99,45%	0,23%	0,32%
Residuos cobre	99,51%	0,05%	0,44%
Residuos aceite	58,44%	7,10%	34,46%
Residuos químicos	0,00%	15,72%	84,28%
Residuos madera	80,89%	8,14%	10,97%

Por último, para el transformador del año 2050, teniendo en cuenta el aumento en el coste de las materias primas, se considera que la totalidad de estas se reciclarán.

6. ANÁLISIS DEL IMPACTO E INTERPRETACIÓN DEL ACV

A partir del análisis de inventario, en el que se modelan los procesos asociados al ciclo de vida, se obtienen los resultados de cada una de las categorías de impacto seleccionadas. En esta etapa del ACV se estudiarán los resultados obtenidos para cada uno de los procesos. A continuación, se presenta un resumen del proceso de cálculo de los impactos.

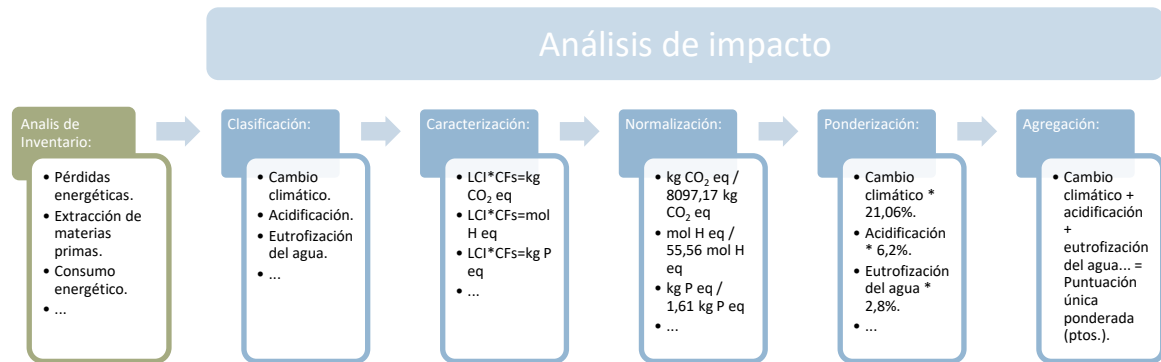


Figura 24: Esquema de la realización del análisis de impacto.

Esta fase se ha estructurado en cuatro apartados en función de los impactos analizados. En primer lugar, se muestran los valores absolutos de las categorías de impacto obtenidas para cada transformador. Tras esto, se presentan los resultados normalizados y ponderados de los ACV realizados, lo cual permite un análisis general del desempeño ambiental de los transformadores analizados. También se incluye un apartado en el que se representan los impactos asociados a los mixes de generación empleados en el trabajo, ya que están directamente relacionados con los impactos de la fase de operación. Por último, se recoge en una tabla los porcentajes de reducción de cada uno de los transformadores, para los impactos analizados y para cada una de las etapas consideradas.

6.1 PRINCIPALES IMPACTOS AMBIENTALES DEL ACV DEL TRANSFORMADOR

En primer lugar, se muestran los resultados de caracterización de cada uno de los impactos para el ACV de los tres transformadores estudiados: transformador de 1980 (fabricante 1), transformador de 2022 (fabricante 1) y transformador de 2050.

En primer lugar, se muestran la caracterización del impacto de cambio climático, directamente asociado a la emisión de gases de efecto invernadero. Se representan los valores para cada una de las etapas del ACV y se realiza un análisis de los aspectos más relevantes para cuantificar este impacto.

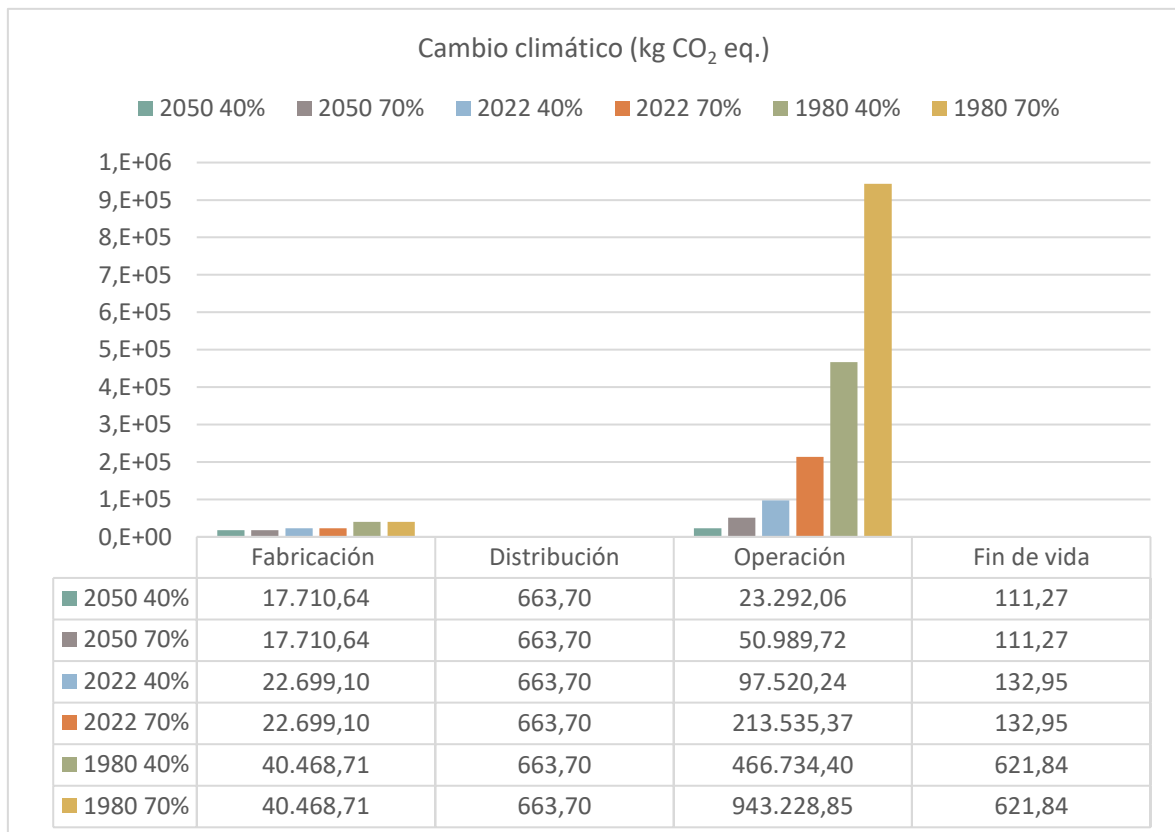


Figura 25: Caracterización del impacto de cambio climático (kg CO₂ eq.) del ACV del transformador.

A través de la representación del valor absoluto de la categoría de impacto de cambio climático se puede observar la importante disminución de este gracias a las acciones de reducción de la etapa de operación. Considerando que se instala un centro de transformación cada 100 puntos de suministros y en España hay alrededor de 30 millones de puntos de suministros, en la red eléctrica habría alrededor de 300.000 transformadores. Suponiendo que todos son semejantes al transformador estudiado y funcionan con un índice de carga del 40% constante, por cada transformador se estaría ahorrando 369.214 kg de CO₂ eq. para la fase de operación durante 35

años entre el transformador de 1980 y el de 2022. El valor equivalente de emisiones evitadas para el conjunto total de transformadores serían $1,10E+11$ kg de CO₂ eq. en 35 años. Por lo que se puede afirmar que la disminución de los kg de CO₂ equivalente emitidos a la atmósfera es especialmente relevante al comparar la operación del transformador de 1980 frente al de 2022.

La transición energética requiere una electrificación de la economía que implica un importante desarrollo de la red de distribución donde el papel crucial del transformador aumentará. El desarrollo de recursos energéticos distribuidos requiere un aumento en el número de transformadores instalados en las redes eléctricas. Por ello, es relevante minimizar el impacto generado por estas máquinas, dado que su importante volumen implica una elevada cantidad de gases de efecto invernadero totales emitidas a la atmósfera.

En el artículo *“The greenhouse gas emissions of power transformers based on life cycle analysis”* [22] se estudia la huella de carbono del ciclo de vida de un transformador instalado en Francia. El transformador analizado no coincide con el transformador estudiado en este trabajo, siendo este de mayor potencia. Además, al ser su potencia mayor, la huella de carbono sigue la PCR de *“PCR 2019:12 Liquid immersed power transformers (>25 MVA)”* [32] que incluye criterios distintos a los recogidos en la PCR seguida en este estudio. Por lo que sus resultados no son directamente comparables, sin embargo, dado que se presentan los valores porcentuales del impacto de cada una de las etapas se han utilizado para compararlos de manera aproximada. En este artículo el impacto de la fase de operación representa el 96% del impacto total de la huella de carbono. Mientras que, en el análisis realizado en este estudio, para un transformador de 2022 con un índice de carga del 40% y el 70%, la fase de operación representa el 81% y el 91%, respectivamente, del impacto total de la huella de carbono. En el artículo se representa en una gráfica las emisiones de kg CO₂ eq. para los dos transformadores analizados, para el transformador más pequeño (50 MVA), para la etapa de operación se indica que se produce un impacto de emisiones de cambio climático (kg CO₂ eq.) para 35 años de alrededor de 37.000 ton CO₂ eq. La caracterización del impacto de cambio climático obtenido para el transformador de 2022 al 40% del índice de carga es de 96.622 kg CO₂ eq., lo cual supone una diferencia de 36.903.378 kg CO₂ eq. y una reducción del 99,74%. La elevada diferencia se debe principalmente a la diferencia de potencia del transformador del artículo, que tiene mayores pérdidas energéticas al ser su potencia 50 MVA.

La etapa de distribución es semejante para todas las etapas del ciclo de vida del transformador, ya que para todas se ha utilizado la misma modelización y factores de caracterización: transporte del transformador desde la fábrica al punto de la red de distribución de España en la que será instalado. Se observa también, como el impacto de cambio climático de la etapa de distribución y de fin de vida no es significativo, al compararlo con los otros impactos.

A continuación, se analiza la categoría de impacto de agotamiento de recursos – fósiles (MJ), también para las cuatro fases del ACV.

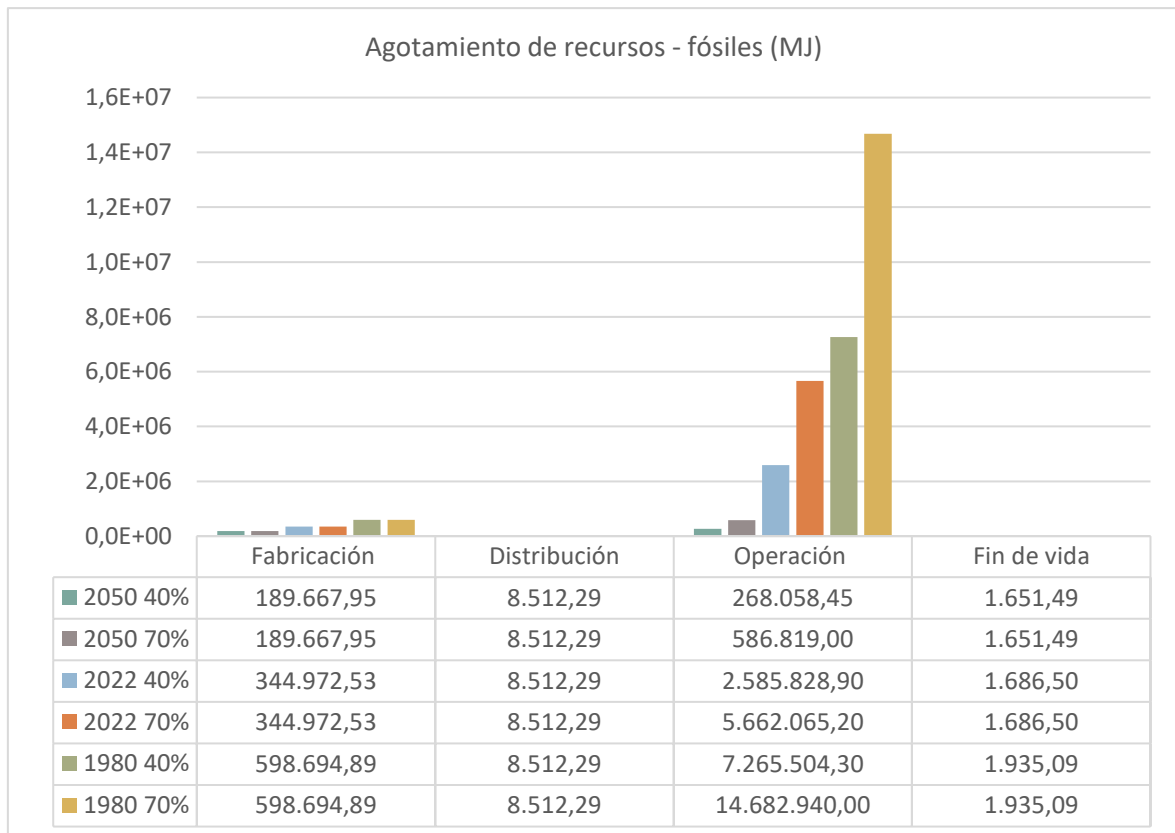


Figura 26: Caracterización del impacto de agotamiento de recursos – fósiles (MJ) del ACV del transformador.

El impacto ambiental del uso de recursos fósiles está estrechamente vinculado al cambio climático. Por este motivo, el comportamiento de esta categoría de impacto es semejante y presenta una reducción a lo largo de la evolución del transformador en el tiempo. Esta reducción se debe a las mismas causas del impacto de cambio climático, las políticas energéticas de evolución del mix de generación hacia una mezcla compuesta por tecnologías que emiten menos gases de efecto invernadero, la reducción de las pérdidas energéticas y el control y captura de las emisiones de las tecnologías con alto impacto en cambio climático.

Los valores asociados a la etapa de operación son tan elevados que el impacto asociado a las etapas de distribución y fin de vida es insignificante y sus resultados no se aprecian en la gráfica. Es por este motivo, que hasta la actualidad el foco estaba únicamente puesto en la reducción de las pérdidas asociadas a la etapa de operación para minimizar su impacto.

Tras esto, se muestra la gráfica asociada a la caracterización del impacto de acidificación y se analiza su evolución para las cuatro etapas del ACV.

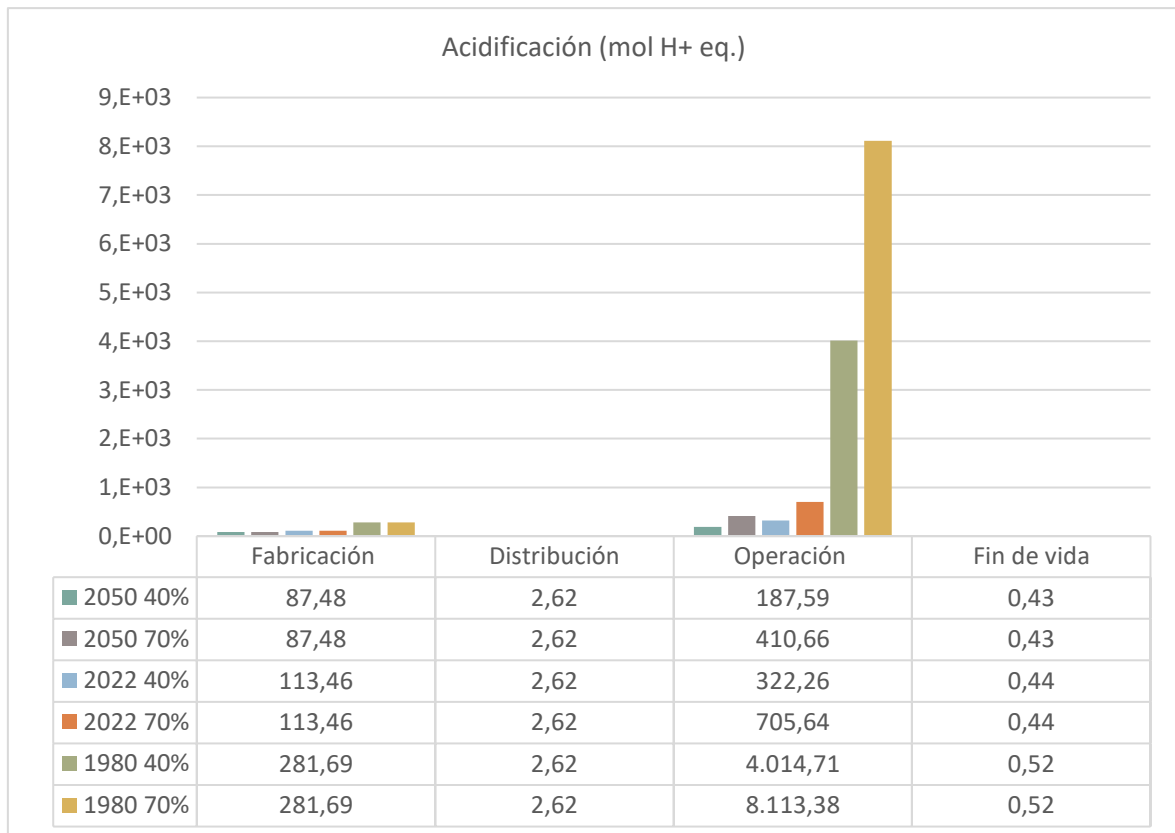


Figura 27: Caracterización del impacto de acidificación (mol H+ eq.) del ACV del transformador.

Respecto a la categoría de acidificación, se observa una reducción significativa, especialmente en la fase de operación. De nuevo el impacto asociado a la fase de operación es tan relevante que el impacto asociado al resto de las etapas parece insignificante. Esto también se debe a que el impacto asociado a la fase de operación se debe al ciclo de vida total del transformador: 35 años. Mientras que la fabricación, la distribución y el fin de vida, aunque su impacto se reparte en el total de la vida útil del transformador, proporcionalmente es menor.

El elevado valor de la caracterización de la acidificación en esta etapa se debe al uso de tecnologías de generación basadas en recursos energéticos con carbón. La producción de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles y especialmente del carbón, libera cantidades significativas de gases y partículas contaminantes como los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno. Una vez emitidos a la atmósfera, estos gases pueden reaccionar con el agua en forma de vapor y formar ácidos, generando un potencial impacto en el suelo y el agua. La reducción de este tipo de tecnologías y la mejora de los métodos de captura y reducción de emisiones, han permitido disminuir de manera significativa este impacto [47; 48].

Otro impacto relevante es el agotamiento de recursos – minerales y metales (kg Sb eq.) cuya gráfica se representa y analiza a continuación:

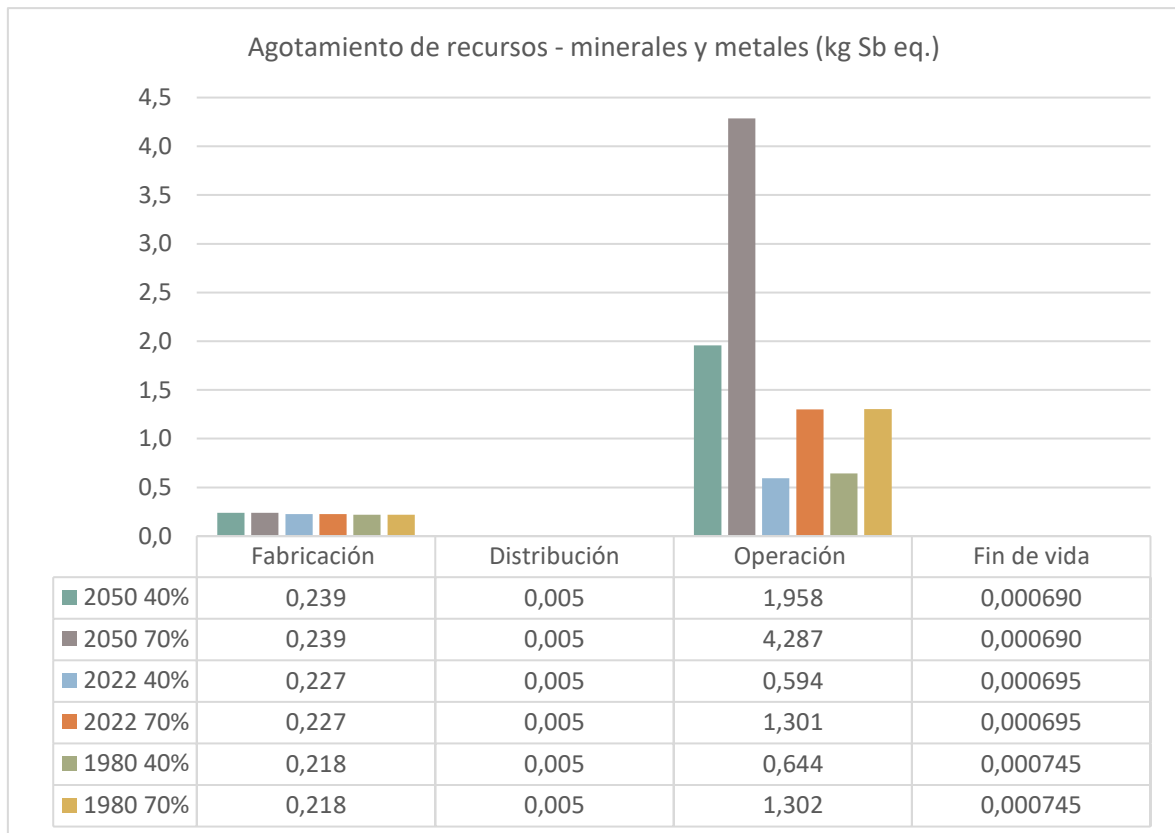


Figura 28: Caracterización del agotamiento de recursos – minerales y metales (kg Sb eq.) del ACV del transformador.

En cuanto al impacto de agotamiento de recursos – minerales y metales, se observa un aumento al comparar la operación del transformador de 2050 con el de 1980. Este aumento se debe a la evolución del mix de generación hacia tecnologías basadas en la electrónica que requieren de este tipo de recursos para su fabricación. El mix de generación utilizado para el transformador de 2050 tiene una alta presencia de energía generada con solar fotovoltaica, cuyo impacto ambiental en la categoría de agotamiento de recursos – minerales y metales es elevado.

Además, se observa como en la fase de operación el aumento de este impacto es especialmente relevante, ya que está directamente relacionada con la generación eléctrica. La fase de fabricación, aunque también mantiene una relación con el mix de generación, este no tiene tanta influencia. Por este motivo, se observa también un incremento del impacto, pero no tan relevante.

Por último, se han representado la caracterización del resto de categorías de impacto analizadas: eutrofización del agua (kg P eq.), consumo de agua (m³ deprove), agotamiento de la capa de ozono (kg CFC 11 eq.) y formación de ozono fotoquímico (kg NMVOC). Se analizan los resultados obtenidos para estas categorías en las etapas del ACV.

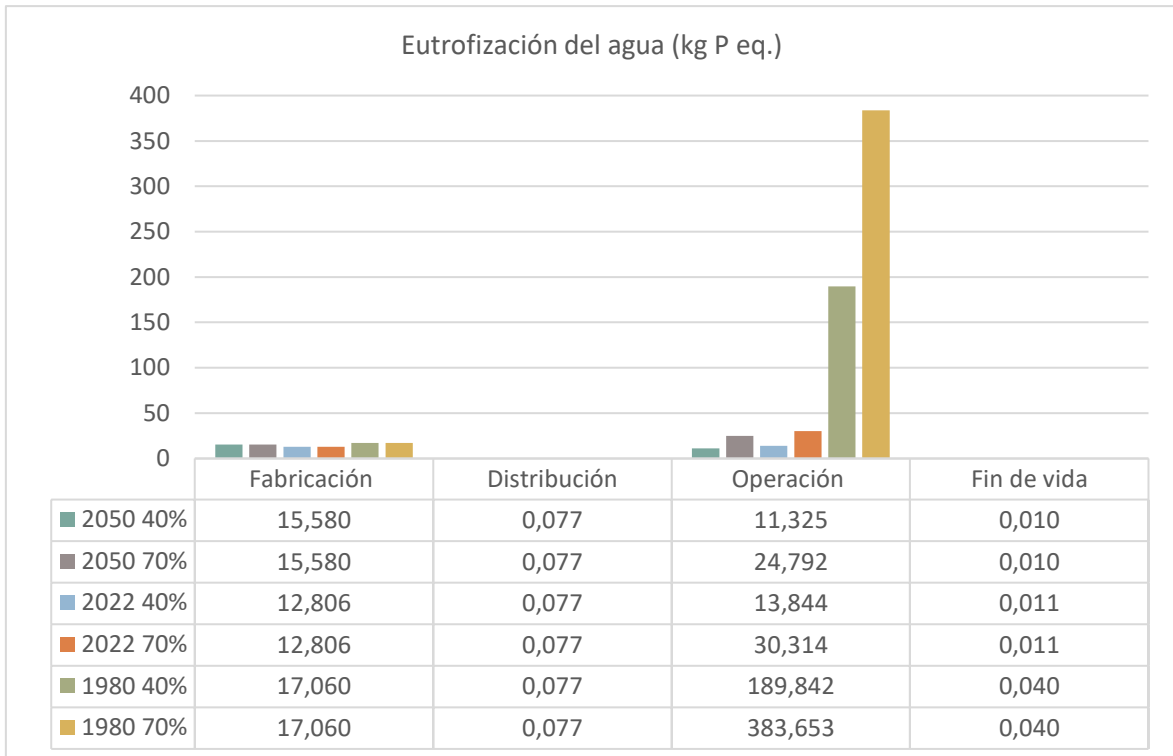


Figura 29: Caracterización de la eutrofización del agua (kg P eq.) del ACV del transformador.

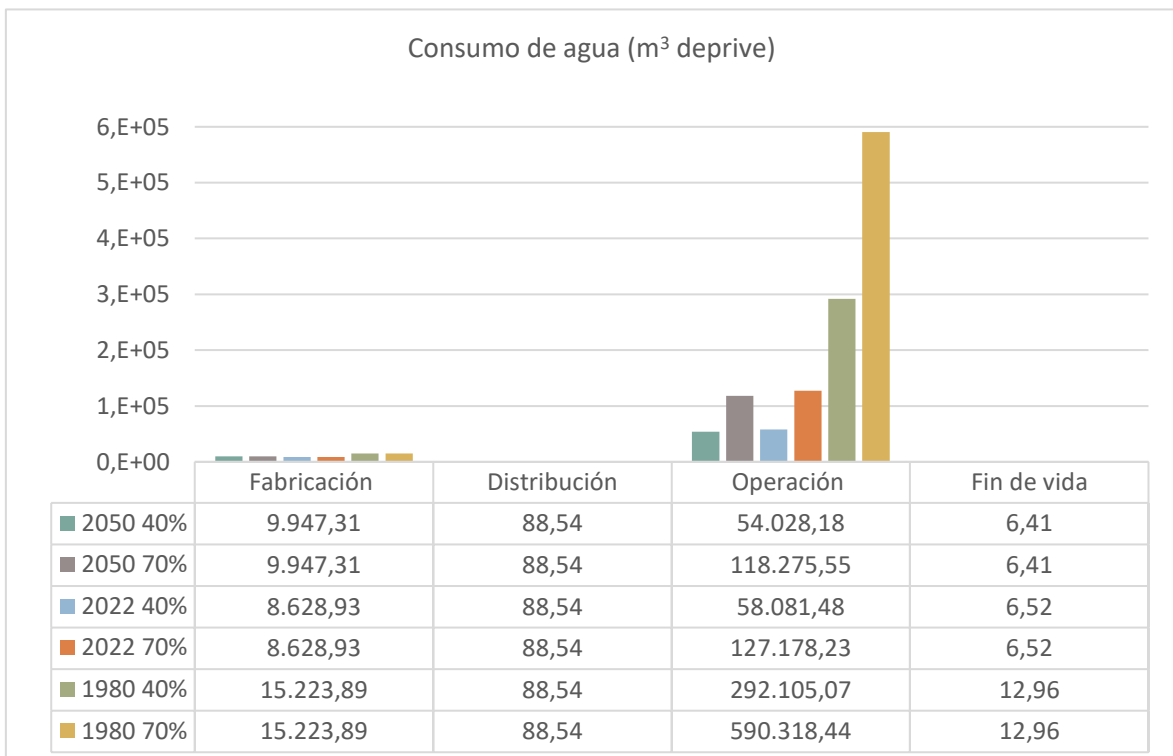


Figura 30: Caracterización del consumo de agua (m³ de prive) del ACV del transformador.

Se observa en general una disminución de la cuantía de los impactos asociados al agua: eutrofización del agua y consumo de agua. La etapa más relevante para estos impactos continúa siendo la operación. No obstante, para el caso de la eutrofización del agua se observa como durante la fabricación la caracterización del impacto aumenta para el transformador de 2050 en comparación con el de 2022. Esto se debe a que las técnicas de reciclaje requieren procesos más complejos que a menudo pueden desencadenar mayores impactos en otras etapas.

Por último, se representa la caracterización de los impactos de agotamiento de la capa de ozono y de formación de ozono fotoquímico, para los tres transformadores analizados y para las etapas consideradas del ACV.

De manera general, los valores de estos impactos se reducen al comparar los transformadores de 1980, 2022 y 2050. Para estas categorías de impacto las etapas más relevantes continúan siendo la fase de operación y de fabricación. El impacto asociado a las etapas de distribución y fin de vida para estas categorías en comparación es insignificante.

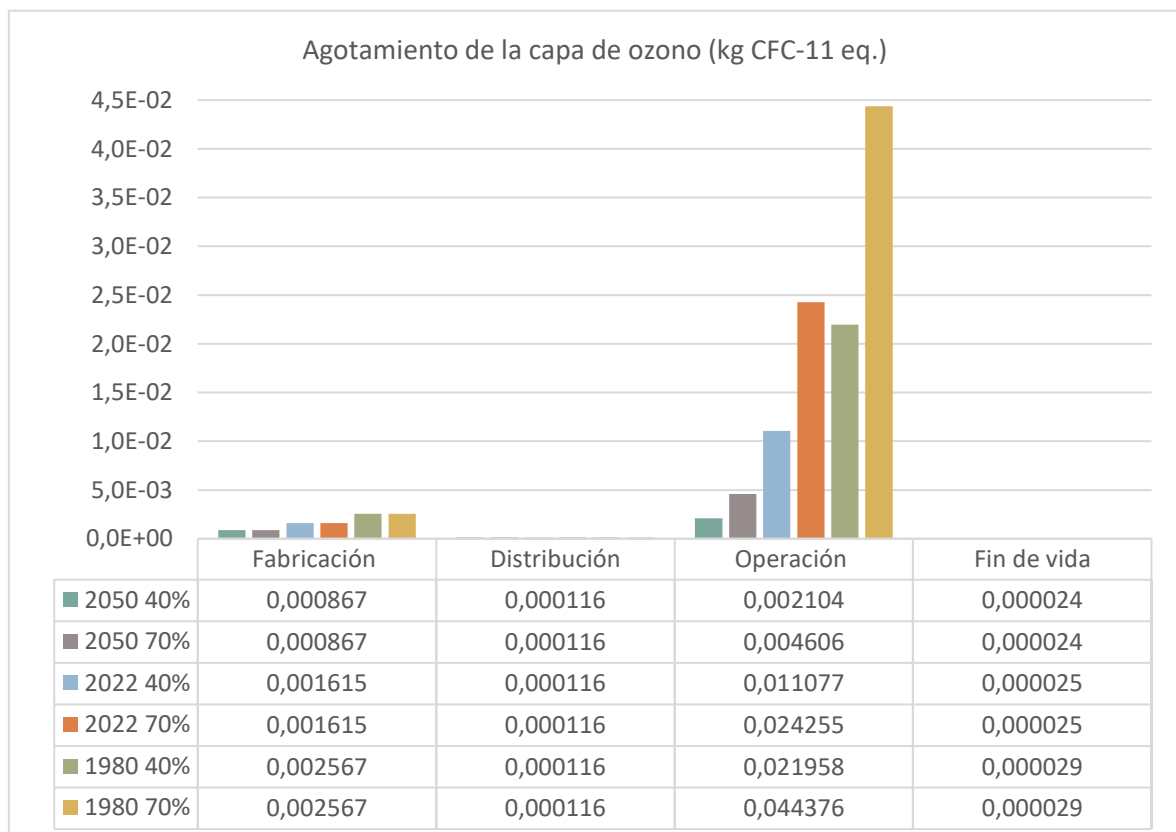
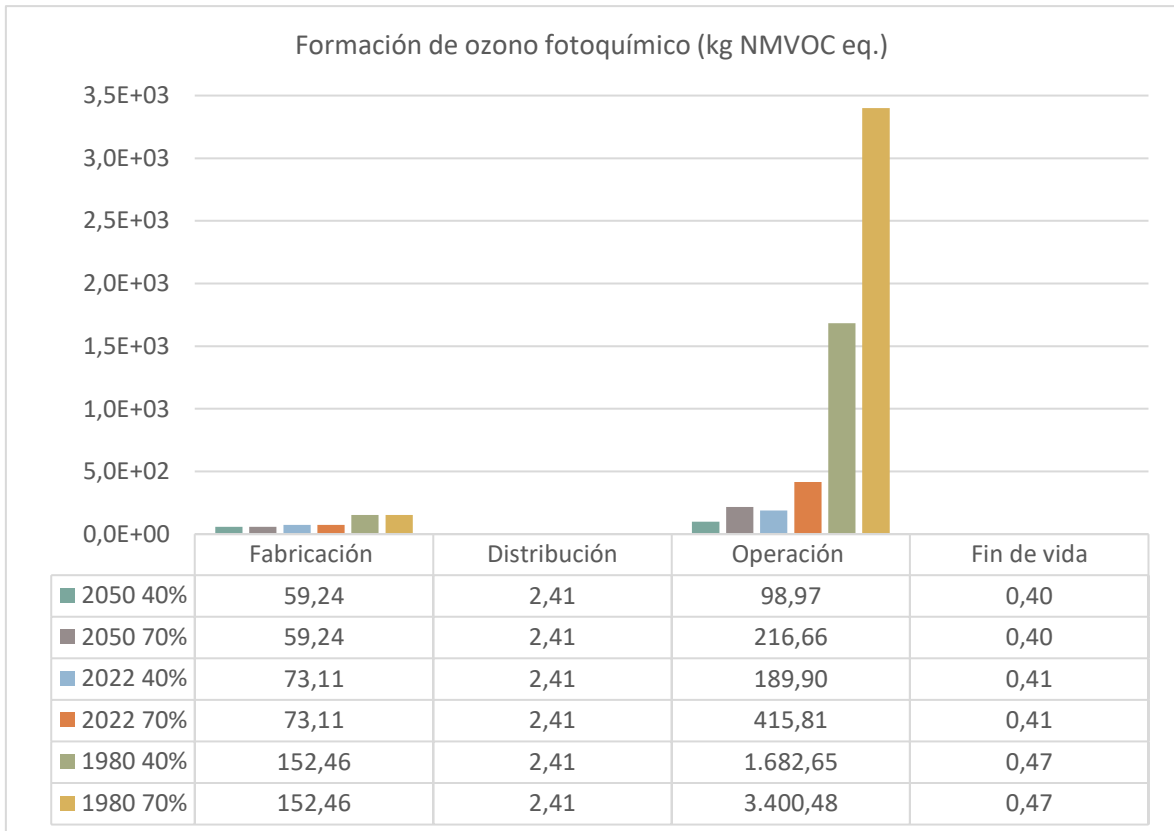


Figura 31: Caracterización del agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.) del ACV del transformador.



*

Figura 32: Caracterización de la formación de ozono fotoquímico (kg NMVOC eq.) del ACV del transformador.

6.2 RESULTADOS NORMALIZADOS Y PONDERADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras la ponderación y normalización de las categorías de impacto para las cuatro fases de estudio de los ACV de los tres transformadores estudiados: transformador de 1980 (fabricante 1), transformador de 2022 (fabricante 1) y transformador de 2050.

Para la normalización y ponderación se ha seguido el método EF 3.0 descrito en el apartado 4.2.5. La representación de los valores normalizados y ponderados permite comparar todos los impactos entre sí, pudiendo así conocer el desempeño medioambiental de los tres transformadores analizados para entender su evolución en el tiempo y adquirir la capacidad de seleccionar los impactos y las etapas más relevantes.

Durante los años se han aplicado diferentes normativas medioambientales y los procesos de fabricación del transformador han ido evolucionando con ellas. Obtener una mirada de la evolución de su desempeño medioambiental permite conocer como de eficaces han sido estas iniciativas y confirmar que el foco de reducción está centrado en el impacto más relevante.

Tabla 9: Resultados del ACV del transformador normalizados y ponderados.

		Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Acidificación	Eutrofización, agua dulce	Formación de ozono fotoquímico	Agotamiento de recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos – fósiles	Consumo de agua
2022 40%	Fabricación	9,01E-01	2,90E-03	1,93E-01	3,41E-01	1,31E-01	4,11E-01	6,74E-01	9,77E-02
	Distribución	2,63E-02	2,09E-04	4,47E-03	2,06E-03	4,33E-03	8,36E-03	1,66E-02	1,00E-03
	Operación	3,87E+00	1,99E-02	5,49E-01	3,68E-01	3,41E-01	1,08E+00	5,05E+00	6,58E-01
	Fin de vida	5,28E-03	4,45E-05	7,52E-04	2,83E-04	7,37E-04	1,26E-03	3,29E-03	7,38E-05
	Total	4,80E+00	2,30E-02	7,47E-01	7,11E-01	4,78E-01	1,50E+00	5,74E+00	7,56E-01

		Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Acidificación	Eutrofización, agua dulce	Formación de ozono fotoquímico	Agotamiento de recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos – fósiles	Consumo de agua
2022 70%	Fabricación	9,01E-01	2,90E-03	1,93E-01	3,41E-01	1,31E-01	4,11E-01	6,74E-01	9,77E-02
	Distribución	2,63E-02	2,09E-04	4,47E-03	2,06E-03	4,33E-03	8,36E-03	1,66E-02	1,00E-03
	Operación	8,48E+00	4,35E-02	1,20E+00	8,06E-01	7,47E-01	2,36E+00	1,11E+01	1,44E+00
	Fin de vida	5,28E-03	4,45E-05	7,52E-04	2,83E-04	7,37E-04	1,26E-03	3,29E-03	7,38E-05
	Total	9,41E+00	4,67E-02	1,40E+00	1,15E+00	8,83E-01	2,78E+00	1,17E+01	1,54E+00

		Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Acidificación	Eutrofización, agua dulce	Formación de ozono fotoquímico	Agotamiento de recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos – fósiles	Consumo de agua
1980 40%	Fabricación	1,61E+00	4,61E-03	4,80E-01	4,54E-01	2,74E-01	3,95E-01	1,17E+00	1,72E-01
	Distribución	2,63E-02	2,09E-04	4,47E-03	2,06E-03	4,33E-03	8,36E-03	1,66E-02	1,00E-03
	Operación	1,85E+00	3,94E-02	6,84E+00	5,05E+00	3,02E+00	1,17E+00	1,42E+01	3,31E+00
	Fin de vida	2,47E-02	5,15E-05	8,93E-04	1,06E-03	8,48E-04	1,35E-03	3,78E-03	1,47E-04
	Total	2,02E+01	4,43E-02	7,32E+00	5,50E+00	3,30E+00	1,57E+00	1,54E+01	3,48E+00

		Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Acidificación	Eutrofización, agua dulce	Formación de ozono fotoquímico	Agotamiento de recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos – fósiles	Consumo de agua
1980 70%	Fabricación	1,61E+00	4,61E-03	4,80E-01	4,54E-01	2,74E-01	3,95E-01	1,17E+00	1,72E-01
	Distribución	2,63E-02	2,09E-04	4,47E-03	2,06E-03	4,33E-03	8,36E-03	1,66E-02	1,00E-03
	Operación	3,74E+01	7,96E-02	1,38E+01	1,02E+01	6,11E+00	2,36E+00	2,87E+01	6,68E+00
	Fin de vida	2,47E-02	5,15E-05	8,93E-04	1,06E-03	8,48E-04	1,35E-03	3,78E-03	1,47E-04
	Total	3,91E+01	8,45E-02	1,43E+01	1,07E+01	6,39E+00	2,76E+00	2,99E+01	6,86E+00

		Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Acidificación	Eutrofización, agua dulce	Formación de ozono fotoquímico	Agotamiento de recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos – fósiles	Consumo de agua
2050 40%	Fabricación	7,03E-01	1,56E-03	1,49E-01	4,14E-01	1,06E-01	4,33E-01	3,70E-01	1,13E-01
	Distribución	2,63E-02	2,09E-04	4,47E-03	2,06E-03	4,33E-03	8,36E-03	1,66E-02	1,00E-03
	Operación	9,24E-01	3,78E-03	3,19E-01	3,01E-01	1,78E-01	3,54E+00	5,23E-01	6,12E-01
	Fin de vida	4,42E-03	4,35E-05	7,37E-04	2,74E-04	7,26E-04	1,25E-03	3,22E-03	7,25E-05
	Total	1,66E+00	5,59E-03	4,74E-01	7,18E-01	2,89E-01	3,99E+00	9,14E-01	7,25E-01

		Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Acidificación	Eutrofización, agua dulce	Formación de ozono fotoquímico	Agotamiento de recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos – fósiles	Consumo de agua
2050 70%	Fabricación	7,03E-01	1,56E-03	1,49E-01	4,14E-01	1,06E-01	4,33E-01	3,70E-01	1,13E-01
	Distribución	2,63E-02	2,09E-04	4,47E-03	2,06E-03	4,33E-03	8,36E-03	1,66E-02	1,00E-03
	Operación	2,02E+00	8,27E-03	6,99E-01	6,59E-01	3,89E-01	7,76E+00	1,15E+00	1,34E+00
	Fin de vida	4,42E-03	4,35E-05	7,37E-04	2,74E-04	7,26E-04	1,25E-03	3,22E-03	7,25E-05
	Total	2,76E+00	1,01E-02	8,54E-01	1,08E+00	5,01E-01	8,20E+00	1,54E+00	1,45E+00

Al observar los resultados se pueden extraer diferentes conclusiones sobre la evolución del desempeño ambiental de los transformadores a lo largo de las últimas décadas e intuir cuál será su evolución durante los próximos años. Las etapas más relevantes en el pasado, presente y futuro corresponden con la operación y la fabricación. De acuerdo con el artículo titulado “*Sustainability assessment of novel transformer technologies in distribution grid applications*” [21] cuyos resultados también muestran que la etapa más relevante es la operación. La vida útil del transformador es larga y operan de manera continua durante toda ella. Por tanto, la energía perdida durante este largo periodo de tiempo es elevada. Por este motivo, la operación ha sido la etapa con mayor potencial de reducción y donde se ha centrado la atención.

No obstante, la evolución de las técnicas de fabricación ha permitido reducir considerablemente las pérdidas energéticas de los transformadores, reduciendo considerablemente el impacto ambiental de esta fase. En consecuencia, se está generando un cambio en el foco de atención hacia otras etapas con mayor potencial de reducción como la fabricación. Pero para seleccionar la etapa más adecuada sobre la que actuar para mejorar el desempeño ambiental es necesario analizar el ciclo de vida completo del transformador. En el artículo anterior se resalta la importancia de analizar el ciclo de vida completo para garantizar la integración de todas las consideraciones ambientales [21].

Respecto a las categorías de impacto ambiental, las más significativas están relacionadas con el cambio climático, la acidificación y el uso de recursos, tanto de minerales y metales como de fósiles. La importancia de cada uno de estos impactos varía a lo largo del tiempo. Para estudiar su evolución y como en función de la época analizada alguna categoría aumenta o disminuye se presenta a continuación un gráfico resumen del impacto total de todas las categorías de impacto normalizados y ponderados de acuerdo siguiendo el método EF 3.0. descrito en el apartado 4.2.5.

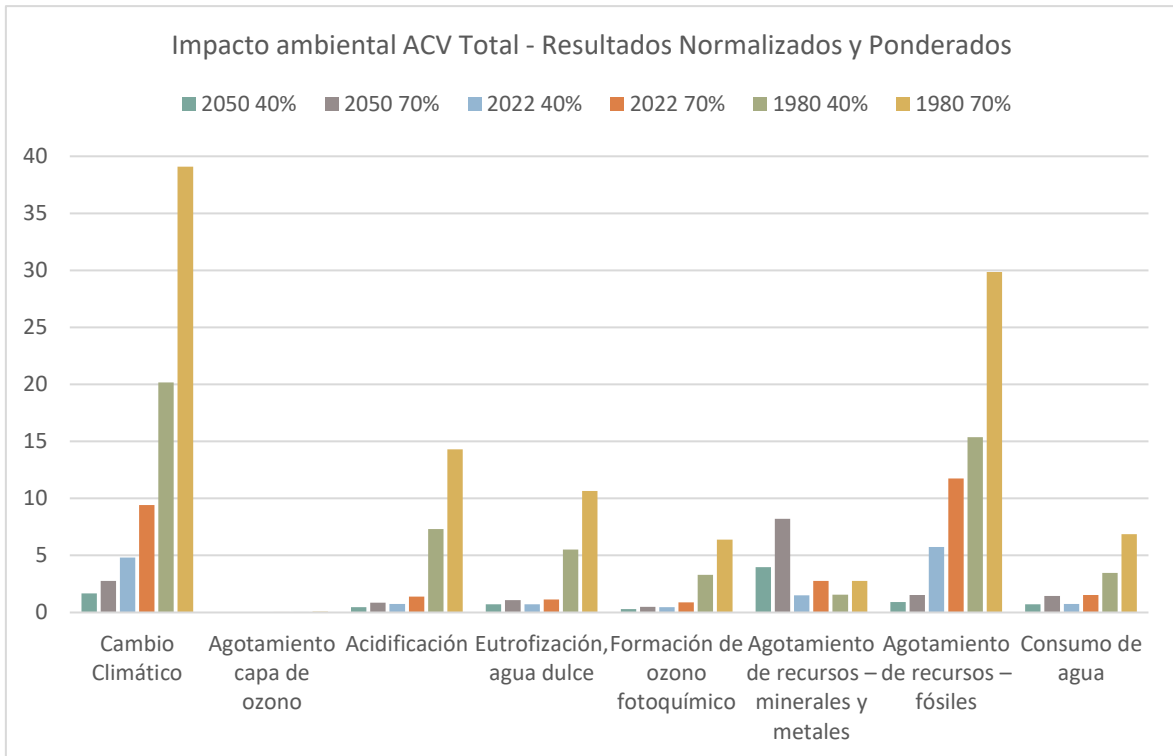


Figura 33: Resultados normalizados y ponderados del Total del ACV del transformador.

A través de la gráfica se puede observar como las políticas de reducción de las emisiones de efecto invernadero como iniciativa de mitigación del cambio climático están teniendo efecto. Las categorías de impacto asociadas a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero se han reducido considerablemente: cambio climático y agotamiento de recursos – fósiles. Esta reducción es consecuencia de dos motivos, por un lado, la mejora de la eficiencia energética de los transformadores a través de la reducción de las pérdidas energéticas asociadas a la fase de operación y por otro, la evolución hacia un mix energético más sostenible y con menores emisiones de efecto invernadero. Las políticas energéticas de las últimas décadas tienen como uno de los objetivos la mitigación del cambio climático, para lo cual, promueven una evolución del mix de generación eléctrico hacia un mix con menor uso de las tecnologías, como los combustibles fósiles, con un alto impacto en la categoría de cambio climático.

La reducción de las pérdidas energéticas ha sido motivo de la normativa desarrollada por la Unión Europea. El transformador es uno de los principales elementos de la red de distribución y transporte y se encuentra en funcionamiento prácticamente todas las horas del año. Por este motivo, la UE tras un análisis del ACV del transformador, desarrolló e implementó normativa específica para establecer unos estándares mínimos de eficiencia energética durante la fase de operación de los transformadores, como el "Reglamento (UE) Nº 548/2014 de la Comisión de 21 de mayo de 2014 por el que se desarrolla la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que respecta a los transformadores de potencia pequeños, medianos y grandes" [49].

Los esfuerzos realizados por reguladores, fabricantes y operadores del sistema eléctrico en reducir las pérdidas energéticas han resultado en una importante mejora del desempeño ambiental de los transformadores.

Para analizar con mayor detalle las etapas de operación y fabricación, se presenta a continuación un gráfico similar al anterior de cada una de las etapas.

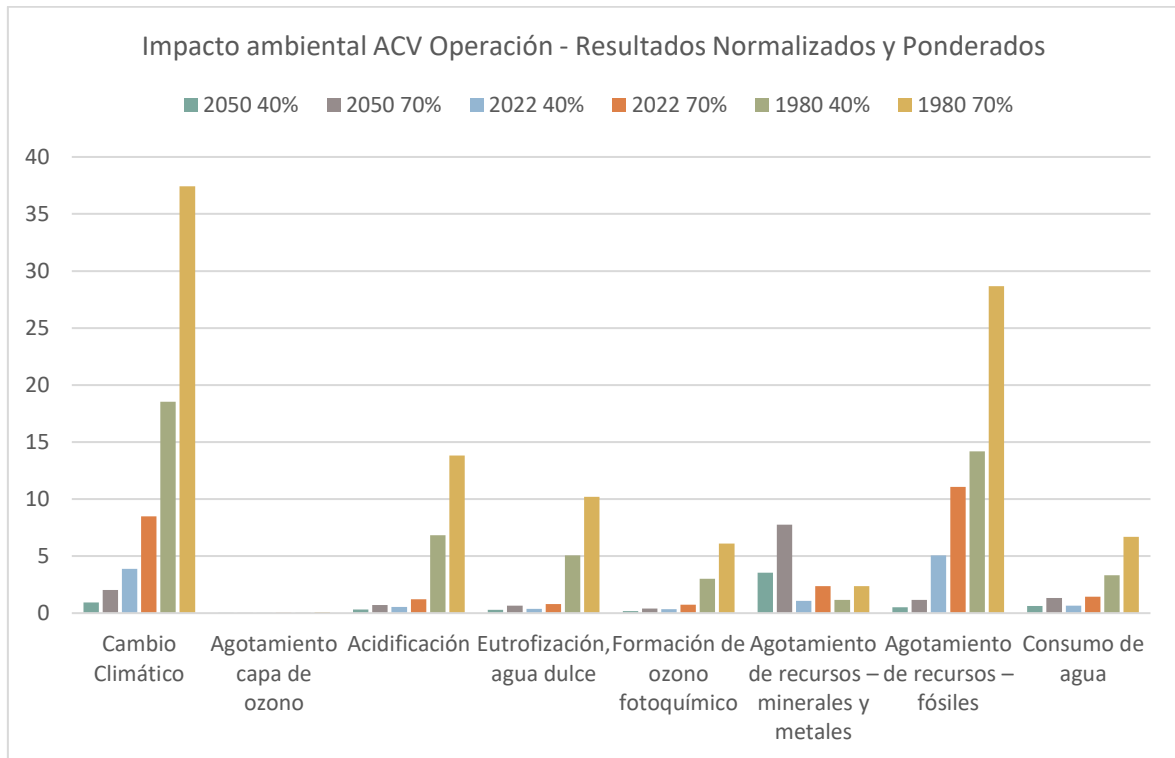


Figura 34: Resultados de la Operación del ACV del transformador.

Como se menciona anteriormente desde la publicación del Reglamento (UE) 548/2014 [49] las acciones de reducción se han enfocado en minimizar las pérdidas energéticas del proceso de transformación de la tensión. En este gráfico específico de la etapa de operación se puede observar como el desempeño ambiental de esta etapa ha mejorado, especialmente las categorías de impacto asociadas al cambio climático. Aunque cabe destacar que los impactos asociados al uso de recursos minerales y metálicos ha aumentado. Esto se debe al incremento del porcentaje en el mix de generación eléctrica de tecnologías de generación con electrónica, como la fotovoltaica, que requiere un importante consumo de estos materiales.

El incremento del uso de recursos minerales y metales es un problema al que las industrias de diferentes sectores se están empezando a enfrentar, entre ellos el sector energético. Por este motivo, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) presentó en este año, 2023, el informe "Critical Minerals Market Review" [27] donde destaca como el aumento de la potencia instalada de energías renovables (solar fotovoltaica y eólica) ha originado un crecimiento significativo en la demanda de

minerales (litio, níquel, cobalto y neodimio). Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) promueven el uso de energías más limpias y con menor impacto de cambio climático. Por tanto, a medida que la capacidad instalada de energías renovables aumenta, también lo hará la demanda de estos recursos. El informe de la AIE señala la necesidad de que tanto los países como las empresas desarrollen estrategias de diversificación del suministro y la adopción de prácticas más sostenibles en la adquisición de estas materias primas. La economía circular y el ecodiseño para favorecer la reutilización de este tipo de recursos son iniciativas necesarias para continuar mejorando el desempeño ambiental del transformador.

El aumento del impacto de agotamiento de recursos – minerales y metales sirve para afianzar la importancia de la realización ACV completo del producto a analizar, en este caso el transformador, ya que como se ha observado, las acciones orientadas a disminuir un impacto o el desempeño de una etapa, puede acabar empeorando otra.

El mismo análisis se ha obtenido en el artículo titulado "*Sustainability assessment of novel transformer technologies in distribution applications*" [21]. En él, se destaca que mientras el impacto de cambio climático ha disminuido, el uso de recursos minerales y metálicos ha aumentado debido a la creciente utilización de tecnologías de generación electrónica. También se enfatiza la importancia de incluir un mayor detalle en la fase de operación del ACV del transformador, ya que incluir como actúan las diferentes tecnologías del transformador ante tipos distintos de tecnologías de generación conectadas aguas abajo puede variar el resultado. En el artículo se destaca como implementar tecnologías inteligentes que permiten reajustar los parámetros del transformador, pudiendo así introducir mayor potencia fotovoltaica, puede mejorar el desempeño ambiental de esta etapa. Este análisis de mayor detalle sobre las diferentes tecnologías que pueden integrarse en el transformador y su funcionamiento con la red no se ha realizado en el presente estudio, por lo que no es posible realizar una comparación con sus resultados. No obstante, es un punto relevante que considerar.

El Reglamento (UE) 548/2014 [49] estableció los valores máximos de pérdidas energéticas que deben cumplir los transformadores comercializados en la UE. Desde la publicación de este Reglamento, se han ido actualizando los valores para ser cada vez más restrictivos, ante las mejoras en los procesos de fabricación y la obtención de materiales más robustos. Los valores de eficiencia requeridos actualmente para el transformador analizado son de 99,44%. Este valor ya implica una importante eficiencia energética, que difícilmente puede ser mejorada. Por este motivo, reducir las pérdidas energéticas de los transformadores supone un desafío significativo para los fabricantes, por lo que es esencial evaluar el ACV del transformador para comprender su desempeño ambiental y explorar otras opciones con mayor potencial de reducción.

El artículo sobre las nuevas tecnologías del transformador [21] indica también que la etapa del ciclo de vida en la que hay que poner ahora el foco de atención es la de fabricación. Gracias a la transición energética los impactos asociados a la generación se van a ir reduciendo, de forma que el impacto de la fase de operación también disminuirá.

A continuación, se realiza el análisis de la etapa de fabricación. Como se ha visto, mejorar el rendimiento del transformador significaba comprometer la etapa de fabricación para mejorar la operación. Sin embargo, con la transición energética, la importancia de la operación se reduce y cambia el enfoque hacia la fase de fabricación. Esto permite un examen exclusivo y mejora de la fase de fabricación en sí misma, en lugar de estudiarla únicamente para mejorar la fase operativa del ciclo de vida del transformador.

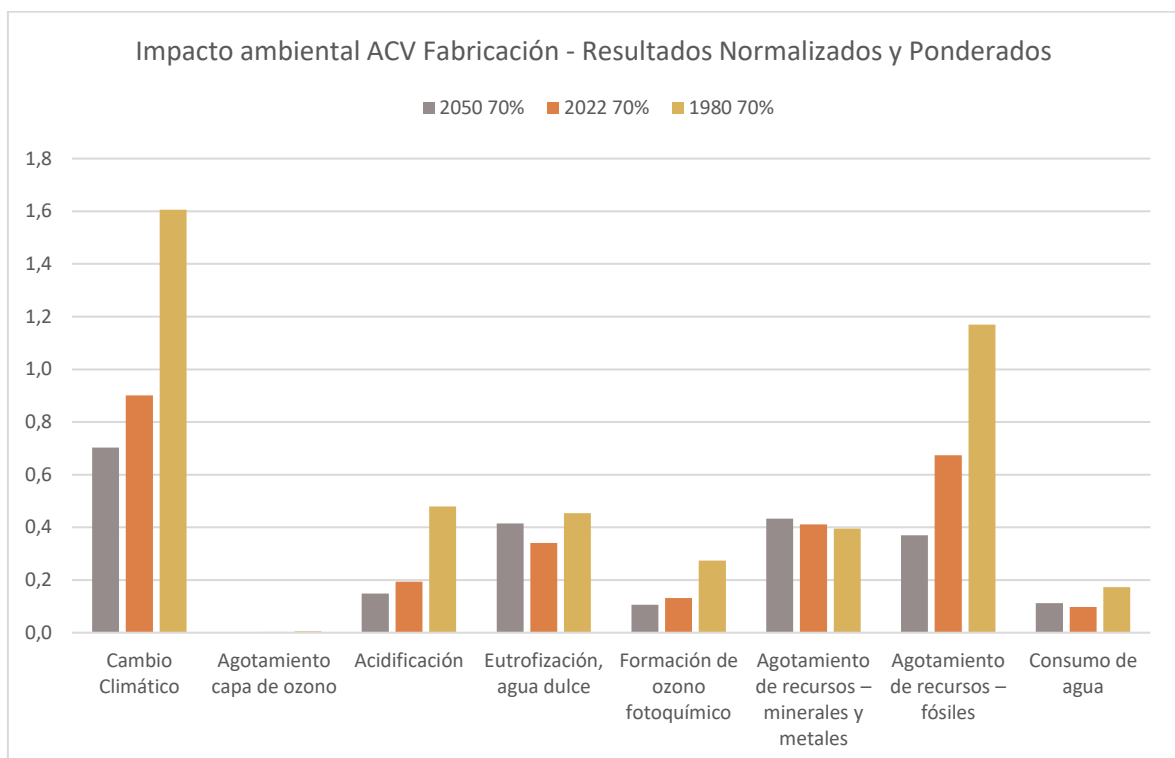


Figura 35: Resultados de la Fabricación del ACV del transformador.

El impacto ambiental de esta etapa se atribuye al consumo de energía involucrado en la preparación de componentes y el ensamblaje del transformador, la extracción de materias primas y el transporte de los subcomponentes a las diferentes fábricas. Los impactos ambientales más relevantes de esta etapa son los asociados al cambio climático, el agotamiento de recursos – minerales y metales, la eutrofización del agua y la acidificación. La mayor parte de ellos se han reducido al comparar el transformador de 1980 con los de 2022 y 2050.

Al analizar la fase de fabricación del ACV del transformador de 2050 se puede observar cómo reducir las materias primas utilizadas, al reutilizar un 20% de estas, y también consumir electricidad procedente de un mix de generación más sostenible resulta en una disminución en la mayoría de los impactos ambientales. Sin embargo, el impacto asociado al agotamiento de recursos - minerales y metales ha sufrido un aumento asociado a un mayor consumo de energía procedente de tecnologías con electrónica como la fotovoltaica.

Por otro lado, al comparar el ACV del transformador de 2022 con el de 2050 se observa como el impacto de eutrofización del agua dulce y del consumo de agua aumentan. Esto se debe al impacto que tienen las técnicas de reciclaje de los materiales.

Las acciones que pueden derivarse para mejorar el desempeño ambiental de esta etapa podrían ir orientadas a reducir el consumo de energía en los procesos de fabricación y minimizar el transporte de las materias primas, los componentes y los subcomponentes. Además, incrementar el porcentaje de componentes reutilizados también implicaría una mejora relevante del desempeño ambiental de la etapa de fabricación.

6.3 IMPACTO AMBIENTAL DE LOS MIX DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

De acuerdo con los apartados anteriores, la fase con mayor impacto es la de operación del transformador, la cual depende directamente del mix de generación. Para mostrar la relación directa de la operación con el mix de generación, en este apartado se ha recogido el impacto para 1kWh de cada uno de los mix de generación utilizados. En primer lugar, se presenta en la caracterización de cada uno de los impactos.

Tabla 10: Caracterización de los impactos para los mixes de generación incluidos en el ACV del transformador.

	Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Acidificación	Eutrofización, agua dulce	Formación de ozono fotoquímico	Agotamiento de recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos – fósiles	Consumo de agua
	kg CO ² eq.	kg CFC 11 eq.	mol H+ eq.	kg P eq.	kg NMVOC eq.	kg Sb eq.	MJ	m ³ deprive
Gen. Mix 1980	5,69E-01	2,68E-08	4,90E-03	2,32E-04	2,05E-03	7,86E-07	8,86E+00	3,56E-01
Gen. Mix 2022	2,49E-01	2,83E-08	8,24E-04	3,54E-05	4,86E-04	1,52E-06	6,64E+00	1,49E-01
Gen. Mix 2050	6,62E-02	5,98E-09	5,33E-04	3,22E-05	2,81E-04	5,56E-06	7,61E-01	1,53E-01

Se puede observar como el impacto de cambio climático disminuye progresivamente junto con el agotamiento de recursos – fósiles, a la vez que la categoría de impacto de agotamiento de recursos – fósiles aumenta.

Tras esto, se han normalizado y ponderado con el método EF 3.0 comentado en el apartado 4.2.5. para los mixes de generación utilizados en el estudio.

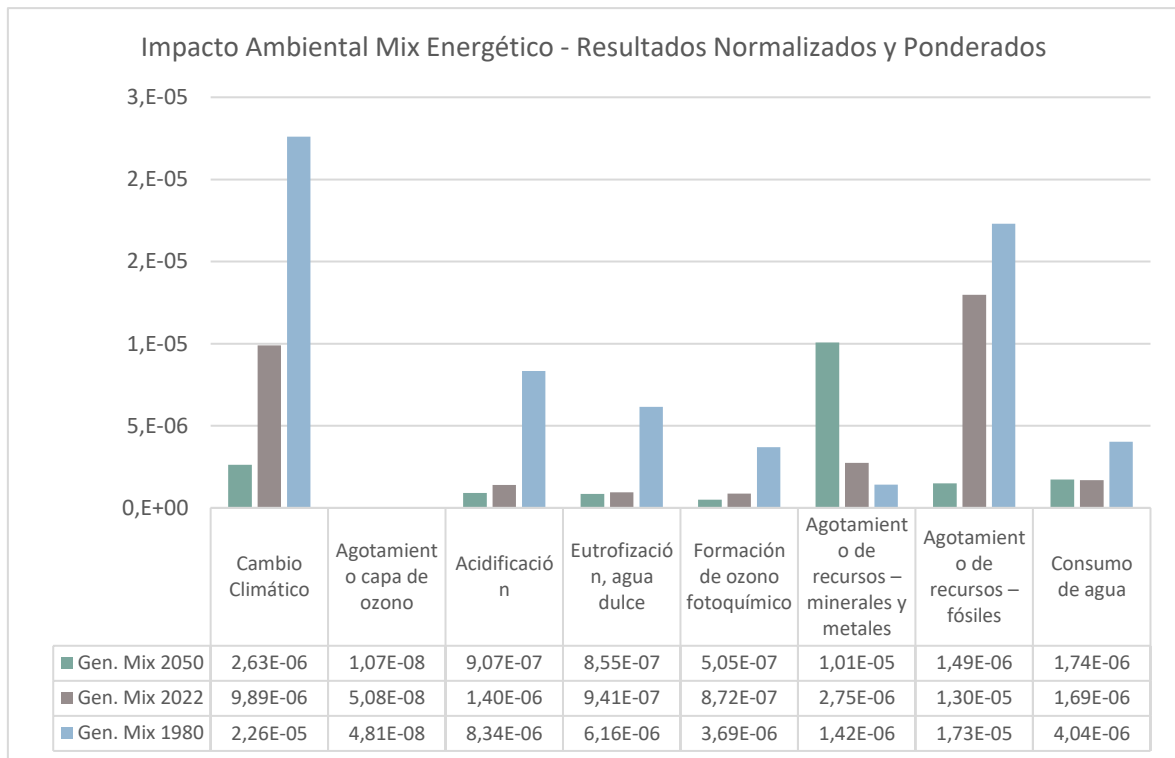


Figura 36: Impacto ambiental de los mix de generación eléctrica.

A través del gráfico, se ve reflejada una tendencia semejante al comportamiento del ACV transformador. Se produce una reducción de los impactos ambientales, especialmente los relacionados con el cambio climático y la acidificación desde 1980 hasta 2050. Aunque como se había observado el impacto de agotamiento de recursos – minerales y metales aumenta en el transformador de 2050.

6.4 REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL ACV DEL TRANSFORMADOR

En esta sección se presenta una tabla resumen en la que se recoge los porcentajes de reducción de cada una de las etapas para comparar la evolución de los transformadores de 1980, 2022 y 2050. La tabla resumen permite observar la tendencia de las diferentes categorías de impacto. Los datos representados significarán una reducción si el porcentaje es positivo y un aumento si es negativo. No se ha incluido la etapa de distribución porque es semejante para todas las etapas.

A través de la tabla, se puede observar que la tendencia general a lo largo de los años es una reducción del impacto ambiental y, por tanto, una mejora del desempeño ambiental. Sin embargo, hay una excepción en las categorías de impacto de agotamiento de recursos - minerales y metálicos, cuyo impacto ha empeorado, como se ha comentado en los apartados anteriores. Se observa un incremento del impacto en torno a un 200% con respecto a los transformadores de 1980.

Tabla 11: Reducción de los impactos ambientales del ACV del transformador.

		Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Acidificación	Eutrofización, agua dulce	Formación de ozono fotoquímico	Agotamiento de recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos – fósiles	Consumo de agua
		kg CO2 eq.	kg CFC 11 eq.	mol H+ eq.	kg P eq.	kg NMVOC eq.	kg Sb eq.	MJ	m3 deprive
Operación 40%-70%		54,33%	54,33%	54,33%	54,33%	54,33%	54,33%	54,33%	54,33%
1980-2022	Fabricación	43,91%	37,10%	59,72%	24,93%	52,04%	-3,85%	42,38%	43,32%
	Operación 40%	79,11%	49,55%	91,97%	92,71%	88,71%	7,78%	64,41%	80,12%
	Operación 70%	77,36%	45,34%	91,30%	92,10%	87,77%	0,08%	61,44%	78,46%
	Fin de vida	78,62%	13,66%	15,76%	73,18%	13,02%	6,78%	12,85%	49,68%
	Total 40%	76,20%	47,98%	89,79%	87,08%	85,54%	4,81%	62,65%	78,27%
	Total 70%	75,94%	44,76%	90,21%	89,22%	86,17%	-0,48%	60,65%	77,56%
2022-2050	Fabricación	21,98%	46,31%	22,90%	-21,66%	18,98%	-5,39%	45,02%	-15,28%
	Operación 40%	76,12%	81,01%	41,79%	18,20%	47,88%	-229,48%	89,63%	6,98%
	Operación 70%	76,12%	81,01%	41,80%	18,21%	47,90%	-229,41%	89,64%	7,00%
	Fin de vida	16,31%	2,26%	2,00%	3,05%	1,51%	0,65%	2,08%	1,77%
	Total 40%	65,48%	75,75%	36,62%	-0,95%	39,43%	-166,49%	84,09%	4,09%
	Total 70%	70,69%	78,42%	39,04%	6,36%	43,32%	-195,47%	86,93%	5,58%
1980-2050	Fabricación	56,24%	66,23%	68,94%	8,68%	61,14%	-9,45%	68,32%	34,66%
	Operación 40%	95,01%	90,42%	95,33%	94,03%	94,12%	-203,85%	96,31%	81,50%
	Operación 70%	94,59%	89,62%	94,94%	93,54%	93,63%	-229,15%	96,00%	79,96%
	Fin de vida	82,11%	15,61%	17,45%	74,00%	14,33%	7,38%	14,66%	50,57%
	Total 40%	91,78%	87,39%	93,53%	86,96%	91,24%	-153,67%	94,06%	79,16%
	Total 70%	92,95%	88,08%	94,03%	89,91%	92,16%	-196,89%	94,86%	78,81%

A destacar los impactos asociados al fin de vida, la reutilización y el reciclado de los materiales del transformador disminuye notablemente los impactos asociados a esta etapa. Para el transformador de 2050, se ha considerado que todos sus componentes se reutilizaban y reciclaban, y para el de 2022, también un porcentaje elevado de materiales se reciclaban. Por este motivo, el principal impacto de esta etapa es el transporte a la planta de gestión por lo que su impacto es reducido y, la comparación con el transformador de 1980 implica una mejora del impacto elevada.

También se ha representado el porcentaje de reducción para comparar la fase de operación considerando un índice de carga del 40% y del 70%. El porcentaje de reducción corresponde con el 54% en todas las etapas, que es proporcional a la diferencia de las pérdidas.

6.5 INTERPRETACIÓN DEL ACV

La realización de los diferentes ACV ha proporcionado información valiosa sobre el impacto ambiental de los transformadores en las diferentes décadas analizadas. Esta información permite identificar las áreas más relevantes y con mayor potencial de reducción del impacto ambiental.

Se recoge a modo resumen el porcentaje del impacto total, normalizado y ponderado, para los ACV realizados para cada transformador para cada una de las etapas.

Tabla 12: Reducción de los impactos ambientales del ACV del transformador.

	Clasificación de los ACV del transformador						Media
	(%) - 2022 40%	(%) - 2022 70%	(%) - 1980 40%	(%) - 1980 70%	(%) - 2050 40%	(%) - 2050 70%	
Fabricación	18,641%	9,502%	8,021%	4,141%	26,110%	13,973%	13,398%
Distribución	0,430%	0,219%	0,112%	0,058%	0,723%	0,387%	0,321%
Operación	80,850%	90,239%	91,809%	95,772%	73,044%	85,574%	86,215%
Fin de vida	0,079%	0,040%	0,058%	0,030%	0,123%	0,066%	0,066%

Las etapas de operación y fabricación son las más relevantes y por este motivo, son las más analizadas. Como se ha visto la transición hacia un mix de generación más sostenible y el alto rendimiento actual de los transformadores plantean un desafío significativo para los fabricantes en la reducción del impacto ambiental de la operación. Por lo tanto, la etapa con mayor potencial de reducción es la fabricación.

Las etapas de distribución y fin de vida son las menos relevantes. Las actividades asociadas a etapas son procesos cortos en comparación con la duración del resto de los procesos modelados, que además requieren de un reducido número de recursos. Por este motivo, tienen un bajo impacto en la vida del transformador y la realización de acciones de reducción de su impacto ambiental no generará una mejora significativa en la evaluación del desempeño medioambiental.

Las principales categorías de impacto analizadas para los transformadores incluyen el cambio climático, la acidificación, el uso de recursos fósiles y el uso de recursos minerales y metálicos. La evolución de los transformadores ha reducido todos los impactos ambientales, excepto el uso de recursos minerales y metálicos, que aumenta para los transformadores en el año 2050 debido al crecimiento de tecnologías de generación intensivas en recursos.

7. PLANTILLA DE LA HERRAMIENTA

7.1 OBJETIVO DE LA HERRAMIENTA

El objetivo de la herramienta es adquirir de manera sencilla información sobre el desempeño medioambiental de los transformadores para la integración de criterios de sostenibilidad en la compra de transformadores.

La compra verde implica integrar criterios ambientales junto a las características funcionales y económicas del transformador. Para la elaboración de la herramienta se han considerado diversos métodos, como definir un nivel mínimo de desempeño ambiental que los transformadores debieran cumplir. Finalmente, el método usado en este estudio consistió en asignar una puntuación basada en el desempeño ambiental y los factores de ponderación seleccionados. Al elegir entre diferentes transformadores que cumplen con requisitos tradicionales, la puntuación de desempeño ambiental actuará como un factor decisivo en la toma de decisiones.

7.2 ESTRUCTURA DE LA HERRAMIENTA

La herramienta se ha elaborado teniendo en cuenta lo descrito en el artículo "*Integrating sustainability in asset management decision making: A case study on streamlined life cycle assessment in asset procurement*" [16]. En el artículo se analiza como simplificar el ACV para utilizar los datos que pueden extraerse en los procesos de compra verde. Para ello, proponen centrarse en los flujos más relevantes de materiales y energía del inventario del ciclo de vida y en las categorías de impacto más significativas. La realización de estas simplificaciones permite utilizar el ACV como método de análisis, sin necesidades altas de conocimiento y tiempo, pero a la vez no comprometer su validez.

La herramienta se estructura en tres páginas, en función de las partes del cálculo del ACV:

- **Entrada de datos:** se presenta un resumen del ACV que sirve de explicación de la herramienta para facilitar la tarea de introducción de los datos necesarios por parte de los fabricantes. El objetivo de esta página es que sea sencillo la introducción de los datos y que los fabricantes tengan fácil acceso a esta información. En caso de que no tengan algún dato, se utilizará el dato del modelo base con una penalización del 15%.
- **Factores de caracterización:** se han extraído de SimaPro los factores de caracterización para cada una de las actividades que se producen en las etapas del ciclo de vida del transformador. Los factores de caracterización se agrupan en función de la etapa. Se han extraído únicamente los factores de caracterización para los siguientes impactos, que corresponden con los recogidos en la EN 50693:2020 [50]:
 - Cambio climático – total.

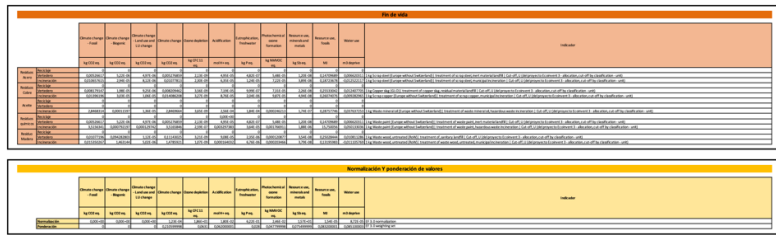


Figura 39: Herramienta de ACV simplificada – factores de caracterización - 2.

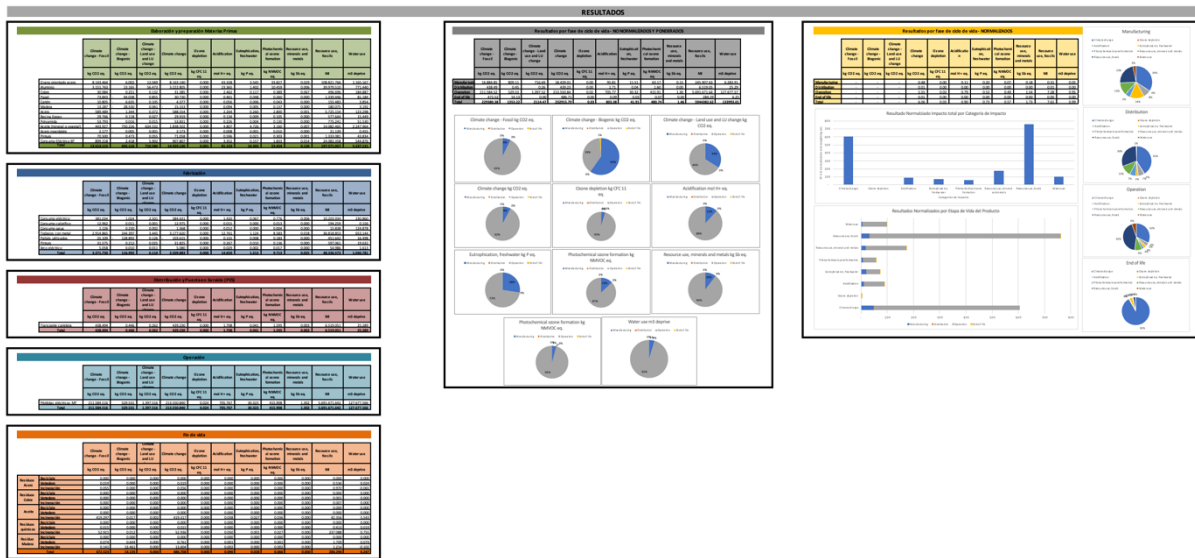


Figura 40: Herramienta de ACV simplificada – resumen de resultados.

7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA HERRAMIENTA

En la hoja de la herramienta de resultados se recoge la caracterización de las categorías de impacto absolutas y normalizados y ponderados. Para integrar los criterios de compra verde, se recoge cada uno de los impactos normalizados y ponderados y se obtiene una puntuación única.

A modo de ejemplo se han analizado tres transformadores procedentes de tres fabricantes diferentes. Las características de cada uno de ellos son semejantes a las del transformador estándar de 2022 con algunas variaciones específicas en función del fabricante considerado. Las materias primas de cada uno de ellos se recogen en el apartado 5.1. Para la fase de operación se ha utilizado un índice de carga del 70% y el mix de generación para 2022.

A continuación, se realiza un breve análisis sobre los resultados obtenidos para cada fabricante. En primer lugar, se presenta la caracterización de las categorías de impacto consideradas para cada uno de los transformadores y las etapas del ACV estudiadas.

Tabla 13: Caracterización de los impactos ambientales para tres transformadores de 2022.

		Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Acidificación	Eutrofización, agua dulce	Formación de ozono fotoquímico	Agotamiento de recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos – fósiles	Consumo de agua
		kg CO ² eq.	kg CFC 11 eq.	mol H+ eq.	kg P eq.	kg NMVOC eq.	kg Sb eq.	MJ	m ³ deprive
FAB 1	Fabricación	1,86E+04	1,20E-03	9,68E+01	1,16E+01	6,39E+01	1,52E-01	2,48E+05	6,35E+03
	Distribución	4,45E+02	9,69E-05	1,73E+00	4,13E-02	1,62E+00	2,76E-03	6,61E+03	2,56E+01
	Operación	2,14E+05	2,43E-02	7,06E+02	3,03E+01	4,16E+02	1,30E+00	5,69E+06	1,28E+05
	Fin de vida	6,04E+02	2,88E-05	5,24E-01	3,85E-02	4,71E-01	7,46E-04	1,94E+03	1,27E+01
	Total	1,17E+05	1,24E-02	4,21E+02	2,56E+01	2,55E+02	7,50E-01	2,85E+06	6,47E+04

		Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Acidificación	Eutrofización, agua dulce	Formación de ozono fotoquímico	Agotamiento de recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos – fósiles	Consumo de agua
		kg CO ² eq.	kg CFC 11 eq.	mol H+ eq.	kg P eq.	kg NMVOC eq.	kg Sb eq.	MJ	m ³ deprive
FAB 2	Fabricación	2,19E+04	1,37E-03	1,16E+02	1,37E+01	7,52E+01	1,72E-01	2,90E+05	7,09E+03
	Distribución	4,45E+02	9,69E-05	1,73E+00	4,13E-02	1,62E+00	2,76E-03	6,61E+03	2,56E+01
	Operación	2,84E+05	1,34E-02	7,48E+02	1,01E+02	3,03E+02	1,90E+00	6,13E+06	2,01E+05
	Fin de vida	6,19E+02	2,68E-05	5,08E-01	4,23E-02	4,72E-01	7,57E-04	1,83E+03	1,32E+01
	Total	3,06E+05	1,49E-02	8,66E+02	2,30E+02	3,80E+02	4,21E+00	6,43E+06	2,08E+05

		Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Acidificación	Eutrofización, agua dulce	Formación de ozono fotoquímico	Agotamiento de recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos – fósiles	Consumo de agua
		kg CO ² eq.	kg CFC 11 eq.	mol H+ eq.	kg P eq.	kg NMVOC eq.	kg Sb eq.	MJ	m ³ deprive
FAB 3	Fabricación	2,20E+04	1,36E-03	1,29E+02	1,36E+01	7,80E+01	5,32E-01	2,91E+05	7,89E+03
	Distribución	4,45E+02	9,69E-05	1,73E+00	4,13E-02	1,62E+00	2,76E-03	6,61E+03	2,56E+01
	Operación	2,32E+05	2,06E-02	4,74E+02	9,80E+00	2,52E+02	6,72E-02	5,68E+06	4,89E+04
	Fin de vida	5,88E+02	3,05E-05	5,66E-01	4,02E-02	5,23E-01	8,46E-04	2,07E+03	1,34E+01
	Total	2,55E+05	2,21E-02	6,05E+02	2,35E+01	3,32E+02	6,03E-01	5,98E+06	5,68E+04

A partir de estos valores, se normaliza y pondera con el método EF 3.0 comentado en el apartado 4.2.5. para obtener una puntuación única década transformador.

Tabla 14: Puntuación única del desempeño ambiental de cada transformador.

Fabricante	Puntuación única
Fabricante 1	28,43
Fabricante 2	36,05
Fabricante 3	25,85

De acuerdo con la puntuación obtenida, el transformador procedente del fabricante 3 es el que mejor desempeño medioambiental tiene, al que le sigue el transformador 2. Realizar este análisis a través de una herramienta común para los tres transformadores implica que las consideraciones ambientales son semejantes para los tres transformadores. Esto es especialmente relevante si el objetivo es la integración de criterios ambientales en los procesos de compra, porque garantiza estar seleccionando el producto más sostenible desde un análisis común para todos los productos.

Para entender con mayor detalle cual es la diferencia entre los tres transformadores se presenta una gráfica con los valores totales del impacto ambiental normalizado y ponderado de cada uno de los transformadores.

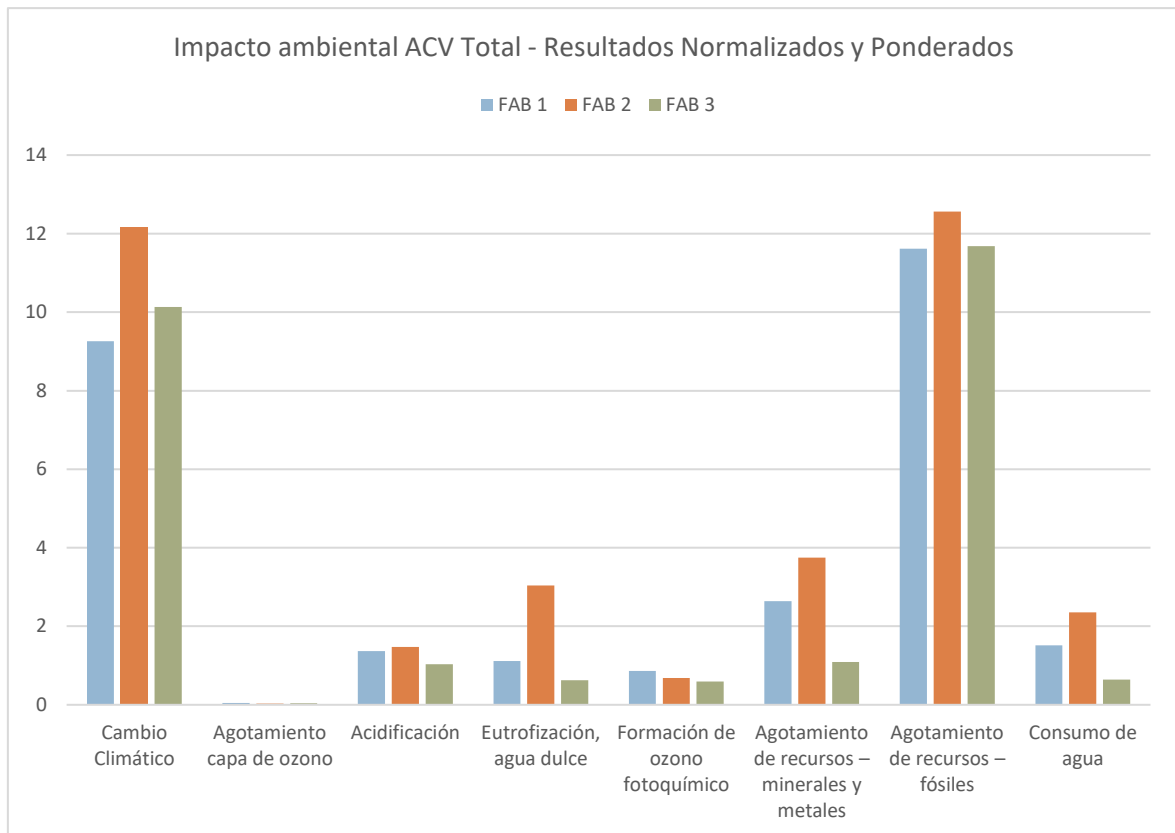


Figura 41: Resultados del impacto ambiental total de los transformadores de los fabricantes 1, 2 y 3 normalizados y ponderados.

Mediante la gráfica se puede observar como el transformador procedente del fabricante 2 tiene peores resultados en todos los impactos ambientales, lo que conlleva una peor puntuación. El mayor impacto de este transformador se debe principalmente a la etapa de operación. Este transformador tiene mayores pérdidas energéticas que el resto de los transformadores. Aunque en general, los resultados muestran un alto nivel de similitud, ya que las variaciones en los procesos de fabricación de estos tres transformadores no son significativas. También la distribución de la masa de las materias primas es semejante comparable y las pérdidas de los transformadores deben ajustarse a las normativas de la UE.

Ante los resultados similares obtenidos para los tres transformadores, que dificulta la diferenciación, se propone una alternativa en la que se establezca una puntuación única máxima para participar en el proceso de compra. Establecer este requisito podría servir como punto de referencia, garantizando que, aunque los resultados puedan ser similares, haya un compromiso constante de reducción del impacto ambiental. [51; 52; 53; 54]

8. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

A través del presente trabajo se ha logrado elaborar una sencilla herramienta para el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) mediante la cual se puede estudiar el impacto medioambiental de un transformador de media tensión para la red de distribución, sin un importante consumo de tiempo y elevados conocimientos. La herramienta permite comparar diferentes transformadores entre sí y de este modo, integrar criterios medioambientales en los procesos de compra.

El modelado de los transformadores de 1980, 2022 y 2050 se ha adquirido un amplio conocimiento sobre el desempeño ambiental del transformador, lo cual permite contar con la información necesaria para promover aquellas acciones que impliquen una mejora en el desempeño ambiental del transformador.

La etapa con mayor impacto ambiental es la operación, representando el promedio del 86,22% (puntuación única tras normalizar y ponderar los resultados) del total de los impactos normalizados de todos los ACV realizados. La longeva vida útil del transformador (35 años) y su funcionamiento continuo hace que, incluso minimizando más las pérdidas de energía, sea difícil reducir el porcentaje total atribuido a la fase de operación.

La incorporación de tecnologías inteligentes en la etapa de operación de los transformadores permite integrar una mayor potencia de energía renovable. Este análisis se encuentra fuera del alcance de este proyecto, cuyo enfoque principal es analizar transformadores estándar proporcionados por los fabricantes para la incorporación de criterios de compra verde. No obstante, a partir del análisis realizado en el presente trabajo, sería una línea futura llevar a cabo un análisis más detallado sobre las tecnologías disponibles o en desarrollo a integrar en los transformadores, para influir en la fase de operación, permitiendo una mayor integración de energías renovables y reduciendo así, el impacto ambiental de esta etapa. Facilitar la integración de mayor potencia renovable implica aprovechar una energía que de otro modo se perdería. Esta línea de trabajo es especialmente significativa, ya que los esfuerzos necesarios para minimizar las pérdidas energéticas son excesivos y en caso contrario es probable que no se pudieran reducir las pérdidas.

La siguiente etapa más relevante y actualmente con mayor potencial de reducción es la etapa de fabricación, que represente alrededor del 13,4% (puntuación única tras normalizar y ponderar los resultados) del impacto total para los resultados normalizados y ponderados. Los impactos de la etapa de fabricación dependen del consumo energético que se produzca para la preparación de los componentes, el consumo de las materias primas y los procesos de fabricación.

Realizar acciones en esta etapa ofrece ventajas desde una perspectiva medioambiental y garantiza la seguridad de suministro. Como se destaca en el informe de la AIE [27], el aumento de las

necesidades de metales en este caso hace necesario que los países lleven a cabo acciones para incentivar la economía circular y el ecodiseño como alternativa a la importación de materias primas, muy dependientes de la demanda y las necesidades, generando una situación de incertidumbre. Además, esta iniciativa está en línea con los objetivos de desarrollo sostenible de la UE que apunta a alcanzar la economía circular en 2050 [55]. Por tanto, llevar a cabo acciones en esta etapa es una iniciativa positiva que, aunque requiera esfuerzo, es altamente beneficiosa.

Los procesos de reciclaje pueden ser complejos y causar impactos negativos en el medio ambiente especialmente si los equipos no están diseñados para un desmantelamiento sencillo y la recuperación de los materiales utilizados. En el caso analizado, el reciclaje y la reutilización de los componentes del transformador de 2050 respecto al de 2022 consigue mejorar el impacto de cambio climático del proceso de fabricación en un 21,98%. Sin embargo, los impactos de eutrofización del agua y consumo de agua empeoran en un -21,66% y en un -15,28%, respectivamente. Por este motivo, promover el ecodiseño es de suma importancia, ya que implica cambiar el proceso de fabricación de forma que sea más sencillo reutilizar y reciclar los componentes, mejorando así el desempeño ambiental del transformador.

En la herramienta desarrollada no se recoge la valoración del ecodiseño del transformador. Por lo que sería interesante como línea futura el análisis del ecodiseño de diferentes transformadores para integrar este criterio en la herramienta y poder integrarlo en el proceso de compra.

La elaboración de la herramienta se ha realizado de forma que sea sencillo para los fabricantes incorporar los datos, facilitando así el acceso a este tipo de herramientas sin que sea necesario tener altos conocimientos ni una importante dedicación de tiempo. Los resultados obtenidos permiten interpretar fácilmente el desempeño ambiental de los diferentes transformadores, estableciendo una puntuación única al transformador.

Además, la monetización del impacto ambiental del transformador que no se ha recogido en el alcance de este proyecto, es también una interesante línea futura que desarrollar. A menudo la toma de decisiones se basa en valores económicos, por lo que la capacidad de asignar un valor monetario al desempeño ambiental del transformador sería de gran interés.

En resumen, a través de este proyecto se demuestra la importancia de realizar un ACV de productos como el transformador para evaluar sus etapas y las categorías de impacto. Trabajar en la reducción de impactos y promover la adopción de criterios de compra verde son acciones clave para avanzar hacia un sector energético más sostenible. Estas medidas, junto con la colaboración entre fabricantes, distribuidores y otros actores del sector, impulsarán la sostenibilidad y contribuirán a la protección del medio ambiente en el contexto de la transición energética.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Commission on Environment and Development. (1987). *Brundtland report: Our common future* <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- [2] World Meteorological Organization. (2021). *State of the global climate 2020 provisional report*. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10444#:~:text=The%20global%20mean%20temperature%20for,warmest%20years%20on%20record%20globally.
- [3] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., & Schellnhuber, H. J. (2009). Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14(2), 33. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>
- [4] Persson, L., Carney Almroth, B. M., Collins, C. D., Cornell, S., de Wit, C. A., Diamond, M. L., Fantke, P., Hassellöv, M., MacLeod, M., & Ryberg, M. W. (2022). Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities. *Environmental Science & Technology*, 56(3), 1510-1521. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c04158>
- [5] Comisión Europea. (2019). *El pacto verde europeo, comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo europeo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones*.
- [6] Consejo de Ministros. (2020). *Plan nacional integrado de energía y clima 2021-2030 (PNIEC)*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- [7] Hunt, R. G. (1974). *Resource and environmental profile analysis of nine beverage container alternatives*. United States Environmental Protection Agency.
- [8] Bjørn, A., Owsianiak, M., Molin, C., & Hauschild, M. Z. (2018). *LCA theory and practice*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_3
- [9] International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040:2006 gestión ambiental — análisis del ciclo de vida — principios y marco de referencia*.
- [10] International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14044:2006 gestión ambiental — análisis del ciclo de vida — requisitos y directrices*.
- [11] Manfredi, S., Allacker, K., Pelletier, N., Chomkamsri, K., & de Souza, D. M. (2012). *Product environmental footprint (PEF) guide*. European Commission-Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability H08 Sustainability Assessment Unit.
- [12] Red Eléctrica España. (2023). *Datos generación españa*. REData.

- [13] Bonilla-Campos, I., Sorbet, F. J., & Astrain, D. (2022). Radical change in the spanish grid: Renewable energy generation profile and electric energy excess. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32, 100941. <https://10.1016/j.segan.2022.100941>
- [14] T. Stetz, F. Marten, & M. Braun. (2013). *Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in germany*. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2198925>
- [15] Serrano Iribarnegara, L., & Martínez Román, J. (2017). *Máquinas eléctricas* (4ª edición ed.). Universitat Politècnica de València.
- [16] Haanstra, W., Gelpke, R., Braaksma, A. J. J., Karakoc, I., & Den Hartog, C. (2019). *Paper 835 - integrating sustainability in asset management decision making: A case study on streamlined life cycle assessment in asset procurement*. 25th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution.
- [17] Bas, T., Izcara, J., Aizpuru, I., & Tejedó, J. R. (2023). *Paper 11056 - A simplified tool for the life cycle analysis of A medium voltage switchgear*. 27th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution.
- [18] Harrison, G. P., Maclean, E. (. J., Karamanlis, S., & Ochoa, L. F. (2010). Life cycle assessment of the transmission network in great britain. *Energy Policy*, 38(7), 3622-3631. <https://10.1016/j.enpol.2010.02.039>
- [19] Borghetto, J., Barberis, F., Berti, R., & Passaglia, R. (2009). *Paper 745 - comparative life cycle assessment of a MV/LV transformer with an amorphouse metal core and a MV/LV transformer with a grain-oriented magn*. 20th International Conference on Electricity Distribution.
- [20] Carlen, M., Överstam, U., Ramanan, V. V., Tepper, J., Swanström, L., Klys, P., & Stryken, E. (2011). *Paper 1145 - life cycle assessment of dry-type and oil-immersed distribution transformers with amorphous metal core*. 21st International Conference on Electricity Distribution.
- [21] Hunziker, C., Lehmann, J., Keller, T., Heim, T., & Schulz, N. (2020). Sustainability assessment of novel transformer technologies in distribution grid applications. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 21, 100314. <https://10.1016/j.segan.2020.100314>
- [22] Guo, H., Gao, Y., & Li, J. (2022). The greenhouse gas emissions of power transformers based on life cycle analysis. *Energy Reports*, 8, 413-419. <https://10.1016/j.egyr.2022.10.078>
- [23] Ghislain, M. M., Gerard, O. B., Emeric, T. N., & Adolphe, M. I. (2022). Improvement of environmental characteristics of natural monoesters for use as insulating liquid in power transformers. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102784. <https://10.1016/j.eti.2022.102784>
- [24] Lopes Silva, D. A., Nunes, A. O., Piekarski, C. M., da Silva Moris, V. A., de Souza, L. S. M., & Rodrigues, T. O. (2019). Why using different life cycle assessment software tools can generate

- different results for the same product system? A cause–effect analysis of the problem. *Sustainable Production and Consumption*, 20, 304-315. <https://10.1016/j.spc.2019.07.005>
- [25] PCR electronic and electrical products and systems, (2023).
- [26] EPDItaly Regulations. (2021). Sub-category PCR electronic and electrical products and systems – power transformers.
- [27] International Energy Agency. (2023). Critical minerals market review 2023. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/afc35261-41b2-47d4-86d6-d5d77fc259be/CriticalMineralsMarketReview2023.pdf>
- [28] Comisión de las Comunidades Europeas. *Sistema Internacional de Datos del Ciclo de Vida de Referencia (ILCD)*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>
- [29] European Commission. (2021). *Understanding product environmental footprint and organisation environmental footprint methods* .
- [30] EPD Italy. (2023). <https://www.epditaly.it/en/>
- [31] EPD International AB. *PCR Library*. <https://environdec.com/pcr-library>
- [32] D’Incognito, V. (2020). *PCR 2019:12 liquid immersed power transformers (>25 MVA) (1.02)* . The International EPD® System.
- [33] *EN 50693 Reglas de categoría de producto para el análisis del ciclo de vida de productos y sistemas eléctricos y electrónicos* . (2019).
- [34] Metodología para el cálculo de la retribución de la actividad de distribución de energía eléctrica. Real Decreto U.S.C. (2013). <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/12/27/1048/con>
- [35] SimaPro. (2023). *LCA software for informed changemakers*. <https://simapro.com/>
- [36] Ecoinvent. (2023). *Ecoinvent Database*. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- [37] EN 15804:2012+A2:2019 sostenibilidad en la construcción. declaraciones ambientales de producto. reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción. , (2019).
- [38] Database & Support team at PRé Sustainability. (2022). SimaPro database manual - methods library. *SimaPro*, <https://simapro.com/wp-content/uploads/2022/07/DatabaseManualMethods.pdf>
- [39] Crenna, E., Secchi, M., Benini, L., & Sala, S. (2019). Global environmental impacts: Data sources and methodological choices for calculating normalization factors for LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(10), 1851-1877. <https://10.1007/s11367-019-01604-y>

- [40] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability. (2019). *International reference life cycle data system (ILCD) handbook - general guide for life cycle assessment - detailed guidance*. Publications Office of the European Union.
- [41] Sala, S., Cerutti, A. K., & Pant, R. (2018). Development of a weighting approach for the environmental footprint. *Publications Office of the European Union*, (EUR 28562 EN)<https://10.2760/446145>
- [42] CTN 207/SC 14 - Transformadores de potencia. (2015). *UNE-EN 60076-1:2013 transformadores de potencia. generalidades*. . Normalización Española (UNE).
- [43] REE. (2023). *REData - Generación | Red Eléctrica*. <https://www.ree.es/es/datos/generacion>
- [44] López Milla. (1999). Memoria estadística eléctrica de UNESA, 1986.
- [45] International Energy Agency. (2021). Net zero by 2050 A roadmap for the global energy sector. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/net-zero-by-2050-scenario>
- [46] Instituto Nacional de Estadística, (. (2023). *Estadística sobre recogida y tratamiento de residuos*. <https://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?tpx=33000&L=0>
- [47] Bouman, E. A. (2020). A life cycle perspective on the benefits of renewable electricity generation. *Norwegian Institute for Air Research – NILU*,
- [48] Rewlay-ngoen, C., Papong, S., & Sampattagul, S. (2014). The NPP and social asset impacts of acidification from coal-fired power plant in thailand. *Energy Procedia*, 52, 234-241. <https://10.1016/j.egypro.2014.07.074>
- [49] Regulation (UE) no 548/2014 on implementing directive 2009/125/EC of the european parliament and of the council with regard to small, medium and large power transformers, Reglamento U.S.C. (2014).
- [50] UNE-EN 50693:200 Product category rules for life cycle assessments of electronic and electrical products and systems, (2020).
- [51] MATELEC s.a.l. (2022). *Environmental product declaration - 630 kVA distribution transformer-FES0300030 (111128)*. EPD Italy.
- [52] IMEFY S.L. INDUSTRIAS MECANO ELECTRICAS FONTECHA YEBENES. (2022). *Environmental product declaration - Distribution transformer immersed in mineral oil with a power from 630KVA, 800KVA, 1000KVA, 1250KVA, 2000KVA (24kV and 36kV)*. EPD Italy.
- [53] Siemens Energy Ltd. (2022). *Environmental product declaration - liquid immersed distribution transformers with 630 kVA operating power*. EPD Italy.
- [54] Ormazabal Cotradis Transformadores, S. (2022). *Environmental product declaration - distribution transformers (630kVa)*

COD 111101 630I/36/25 B2-GST001 MINERAL

rev.04. EPD Italy.

[55] *How the EU wants to achieve a circular economy by 2050.* (2023).

https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20210128STO96607/how-the-eu-wants-to-achieve-a-circular-economy-by-2050?gclid=Cj0KCQjwuZGnBhD1ARIsACxbAVioyikg-xWpvITbpTxW2u_exn_SBFIMurYdE1cDnK_y9VTsYdiDJ9gaAoEsEALw_wcB

[56] Labor de la Comisión de Estadística en relación con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *Anexo - marco de indicadores mundiales para los objetivos de desarrollo sostenible y metas de la agenda 2030 para el desarrollo sostenible.*

ANEXO I: ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El trabajo desarrollado se encuentra enmarcado dentro de los dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), a destacar los ODS 12 - Producción y consumo responsables, 7 - Energía Asequible y no contaminante y 13 - Acción por el clima.



Figura 42: ODS enmarcados dentro del Trabajo de Fin de Máster.

I. OBJETIVO DE DESARROLLO SOSTENIBLE PRINCIPAL: ODS 12, PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

El principal Objetivo de Desarrollo Sostenible con el que está enmarcado el trabajo es el ODS N.º 12: Producción y consumo responsables. La integración de criterios ambientales en los procesos de compra implica la evaluación del desempeño ambiental para la promoción de aquellos productos producidos de manera más responsable. Algunas de las metas del ODS 12 que alcanza este trabajo son:

- Meta 12.2: *“De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.”*
- Meta 12.6: *“Alentar a las empresas, en especial las grandes empresas y las empresas transnacionales, a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes.”*

A partir de la evaluación del impacto ambiental de un producto como el transformador se obtiene información relevante sobre la gestión de los recursos asociados a su ciclo de vida, lo cual permite tomar decisiones que mejoren su utilización y gestión a lo largo del tiempo. La realización de un ACV ofrece la oportunidad de estudiar diferentes escenarios para encontrar las mejores oportunidades de reducción para lograr una gestión sostenible y un uso eficiente de los recursos naturales (**Meta 12.2**).

Además, el desarrollo de una herramienta que permita evaluar el desempeño ambiental de diferentes transformadores para la compra verde de equipos promueve la adopción de prácticas sostenibles por parte de las empresas. Añadiendo que la realización del ACV aporta información valiosa sobre la sostenibilidad de los productos que las empresas utilizan y producen, se contribuye

a la **Meta 12.6** alentando a la creación de informes de sostenibilidad basados en un método científico, comparable y transparente.

Cada una de las metas asociadas a los ODS tiene definidos al menos un indicador, que sirve de referencia para conocer la evolución del ODS. A través de este proyecto se contribuye a los siguientes indicadores asociados a las metas definidas anteriormente:

- Indicador 12.2.1: *“Huella material en términos absolutos, huella material per cápita y huella material por PIB.”*
- Indicador 12.2.2: *“Consumo material interno en términos absolutos, consumo material interno per cápita y consumo material interno por PIB.”*
- Indicador 12.6.1: *“Número de empresas que publican informes sobre sostenibilidad.”*

II. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES SECUNDARIOS

ODS 7, Energía Asequible y no contaminante:

Uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible con los que se alinea el proyecto realizado es el ODS N.º 7: Energía asequible y no contaminante. La transición energética conlleva un importante desarrollo de la red eléctrica para su modernización y adecuación a este nuevo paradigma energético. La renovación de los activos de la red eléctrica debe realizarse teniendo en cuenta los impactos ambientales asociados a su ciclo de vida para asegurar un sector energético sostenible.

Este proyecto comparte principios recogidos en la meta 7.b *“De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo”*. La integración de criterios ambientales para la compra verde promueve el desarrollo de la infraestructura con una alta eficiencia energética y con el menor impacto ambiental posible.

Además, la herramienta desarrollada podría ser fácilmente modificada para su aplicación a empresas de distribución de países en desarrollo y así, contabilizar las inversiones destinadas a la compra verde de transformadores a través de la herramienta en el indicador 7.b.1. *“Inversiones en eficiencia energética en proporción al PIB y a la cuantía de la inversión extranjera directa en transferencias financieras destinadas a infraestructura y tecnología para servicios de desarrollo sostenible”*.

ODS 13, Acción por el clima:

Otro de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles en los que está enmarcado el proyecto es el ODS N.º 13: Acción por el clima. La realización del ACV es un paso esencial para introducir tras esto acciones de mitigación contra el cambio climático, ya que permite conocer la huella de carbono de todas las etapas y procesos del ciclo de vida del transformador para posteriormente identificar las acciones con mayor potencial de reducción.

Entre las metas del ODS 13, el proyecto está asociado a la 13.2 *“Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales”* y la meta 13.3 *“Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana”*.

A través del proyecto se puede conocer la huella de carbono de un transformador y a partir de los datos se pueden realizar medidas en la estrategia y los planes nacionales para promover un desarrollo sostenible de la red. También, el análisis realizado sobre el ACV mejora el conocimiento y la capacidad humana para actuar y reducir el impacto ambiental de los transformadores. [56].

ANEXO II: PLANIFICACIÓN

La planificación de este trabajo se ha dividido en 9 actividades principales que se desarrollan a continuación:

1. **Anexo B:** desarrollo de un documento inicial para enmarcar el trabajo.
2. **Aprendizaje SimaPro:** proceso de aprendizaje de la herramienta con la que se va a trabajar para la elaboración del ACV y que se ha usado de referencia para el desarrollo de la herramienta del trabajo.
3. **Recogida de datos:** obtención de la información asociada a todas las fases del ciclo de vida del producto, transformador.
4. **Herramienta del transformador SimaPro:** realización del ACV del producto en SimaPro.
5. **Herramienta del transformador:** desarrollo de una herramienta en Microsoft Excel que permita realizar de manera sencilla el ACV del producto.
6. **Análisis de resultados:** evaluación de los principales impactos ambientales y contraste con otros artículos.
7. **Corrección de errores:** análisis y revisión de la herramienta.
8. **Redacción del documento final.**

Se recoge un esquema resumen de la planificación seguida durante la elaboración del trabajo:

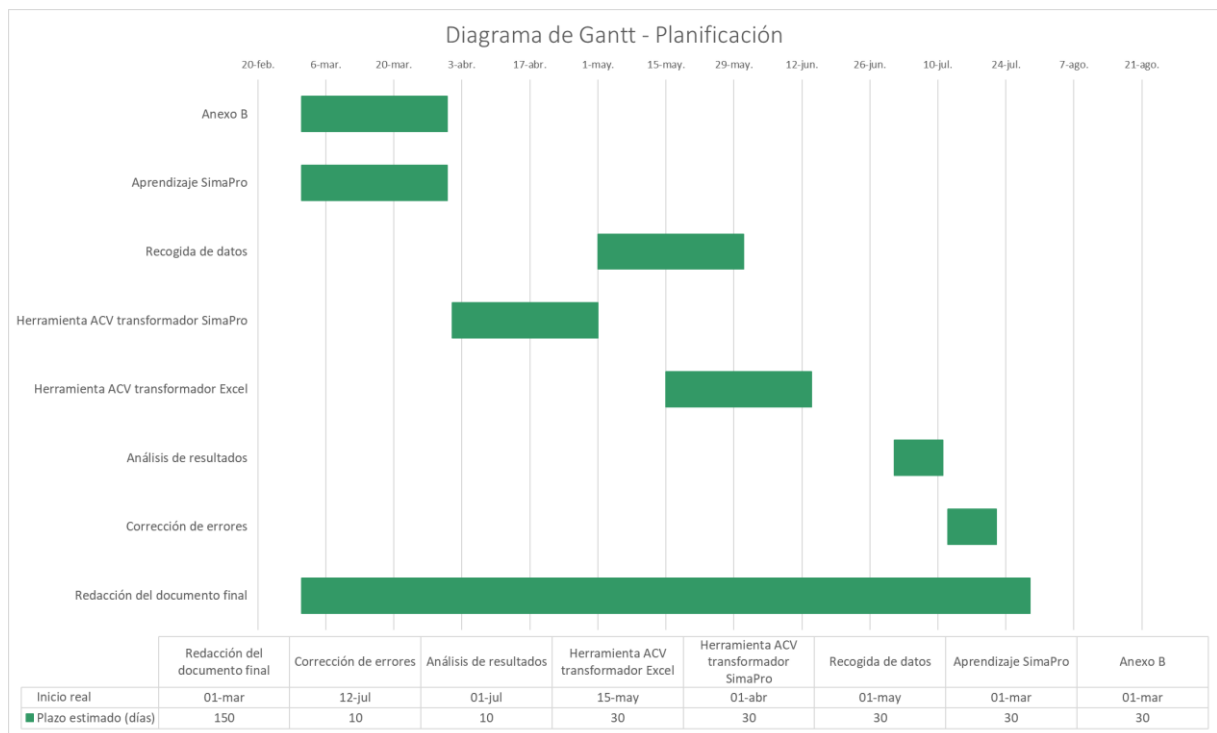


Figura 43: Diagrama de Gantt, planificación del Trabajo Fin de Máster.