



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

**Análisis de Ciclo de Vida del Sistema Eléctrico Español:
Comparación de Tecnologías Renovables mediante Sphera GaBi
y SimaPro.**

Autor: Natalia Gaviria Rosso

Tutors: Mònica Martínez López

Joaquim Serra Rada

Curs acadèmic: 2025-2026

Màster en Energies Renovables i
Sostenibilitat Energètica

Índice

I. Agradecimientos.	3
II. Resumen.	4
III. Abstract.	5
1. Introducción	6
1.1. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	7
2. Objetivos	8
2.1 Objetivo general	8
2.2 Objetivos específicos	8
3. Marco teórico	9
3.1. Análisis de ciclo de vida en sistemas energéticos.	9
3.2. Energía eólica	10
3.3. Energía solar fotovoltaica	11
3.4. Energía solar térmica.	12
3.5. Energía hidroeléctrica	13
3.6. Energía biomasa	14
3.7. Síntesis del desempeño tecnológico	14
4. Metodología	15
4.1. Metodología de análisis de ciclo de vida y software empleado.	15
4.2. Obtención de datos del sistema eléctrico español (REE)	16
4.3. Selección de <i>datasets</i> y modelado del mix eléctrico renovable	17
4.4. Normalización del mix eléctrico renovables.	18
4.5 Unidad Funcional y Límites del Sistema	19
4.6 Desarrollo de escenarios comparativos	20
4.7 Métodos de evaluación de impacto ambiental.	23
4.8 Análisis temporal de generación renovable y emisiones de CO ₂ equivalente.	23
5. Resultados y discusión	24
5.1 Resultados del análisis de ciclo de vida	24
5.1.1 Impacto en cambio climático (IPCC GWP100)	24
5.1.2 Evaluación de impacto global (<i>ReCiPe Endpoint</i>)	27
5.1.3 Demanda de energía primaria	31

5.2 Impacto de las tecnologías renovable.....	33
5.3 Evolución histórica de emisiones de CO₂ y participación renovable en España.....	34
5.4 Análisis variabilidad estacional de la generación eléctrica renovable en España durante 2025.....	36
5.5 Discusión general	37
6.Conclusiones	39
7.Bibliografía.	41
8. Anexos	46

I. Agradecimientos.

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores, Mònica Martínez y Joaquim Serra, por su valiosa guía, paciencia y rigurosidad en la revisión de este trabajo. Sus conocimientos metodológicos y sus observaciones fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo. Asimismo, agradezco al profesorado del máster por brindarme las herramientas técnicas necesarias para mi desarrollo profesional.

A mi madre y a mi abuela, por su amor incondicional, por demostrarme que todos los sueños en la vida se cumplen y por ser mi mayor motor e inspiración para salir adelante. De manera muy especial, a mi padrino, quien, con su presencia constante, su guía y su apoyo incondicional ha asumido un rol fundamental en mi vida, estando siempre pendiente de mí en cada paso.

A Esteban, mi pareja, por ser mi compañero de camino y mi mayor apoyo en la distancia durante todo este proceso; gracias por tu paciencia infinita en los días de mayor estrés y por celebrar conmigo cada pequeño avance.

Mi paso por Barcelona y esta etapa en general no habrían sido lo mismo sin las personas que encontré en el camino. Agradezco de todo corazón a Ana y Lisbany que me acogieron en su hogar brindándome no solo un espacio cálido en Barcelona, sino también su generosidad y alimentándome en tantas ocasiones con comida boliviana y hondureña. De igual manera, quiero extender un agradecimiento muy especial a toda mi familia y amistades; en especial a mi tía, a mi prima y a quien, desde el cariño, se autoproclamó con el rol de madre putativa; gracias a ellas por ser mi soporte absoluto y mi mayor tranquilidad cuando las cosas no marchaban bien allá y la distancia se hacía más difícil. Su apoyo incondicional en los momentos de mayor incertidumbre fue un pilar fundamental. Asimismo, agradezco a cada una de las personas que se hicieron partícipes de este proceso de tantas formas: desde quienes me apoyaron con la logística desde Colombia, hasta aquellos que me recibieron con los brazos abiertos en Madrid. Su generosidad y atención constante fueron esenciales.

Finalmente, a mis amigos del máster: a Zulay y Alejandro, por traer la calidez de nuestra tierra colombiana a esta experiencia compartida, y a Fadoua, por su apoyo y por mostrarme la riqueza de la cultura catalana y sus raíces. Gracias a todos ellos por las largas jornadas de estudio, los cafés compartidos y por hacer de este año una experiencia inolvidable.

II. Resumen.

La transición hacia sistemas eléctricos basados en fuentes renovables es una estrategia para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la descarbonización de procesos industriales. Este trabajo analiza el desempeño ambiental del sistema eléctrico renovable español para el año 2025 mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), y evaluando su influencia sobre la producción de acero mediante horno eléctrico de arco (EAF).

La modelización se desarrolló utilizando *datasets* de la base de datos *ecoinvent* 3.11 y las herramientas de software *Sphera GaBi* y *SimaPro*. El mix eléctrico renovable se construyó a partir de tecnologías eólica, solar fotovoltaica, solar térmica, hidráulica y biomasa, representativas del sistema español. Los impactos ambientales se evaluaron mediante los métodos *IPCC 2013 GWP100*, *ReCiPe Endpoint (H)* y *Primary Energy Demand*.

Se desarrollaron tres escenarios: un escenario base de producción de acero, un escenario con sustitución del suministro eléctrico por un mix renovable español y un escenario basado exclusivamente en energía eólica. Además, se analizó la contribución tecnológica, evolución histórica de emisiones y variabilidad estacional de la generación renovable en España.

Los resultados demuestran que la sustitución del suministro eléctrico convencional por fuentes renovables reduce significativamente las emisiones de CO₂ equivalente, la demanda de energía primaria y los impactos asociados a salud humana, ecosistemas y agotamiento de recursos. El escenario basado exclusivamente en energía eólica presentó el mejor desempeño ambiental global. Asimismo, la comparación entre *Sphera GaBi* y *SimaPro* mostró tendencias coherentes, aunque con diferencias cuantitativas relacionados a particularidades metodológicas de cada plataforma.

En conjunto, los resultados confirman el potencial de la electrificación renovable como herramienta para reducir impactos ambientales y descarbonizar procesos industriales intensivos en energía.

III. Abstract.

The transition towards renewable electricity systems represents a crucial pathway for reducing greenhouse gas emissions and advancing the decarbonization of industrial processes. This study examines the environmental performance of the Spanish renewable electricity system projected for 2025 using Life Cycle Assessment (LCA) and explores its influence on electric arc furnace (EAF) steel production.

The modelling was conducted with datasets from the ecoinvent 3.11 database and the LCA software tools Sphera GaBi and SimaPro. The renewable electricity mix was developed based on representative Spanish technologies, including wind, photovoltaic, concentrated solar, hydropower, and biomass. Environmental impacts were assessed using the IPCC 2013 GWP100, ReCiPe Endpoint (H), and Primary Energy Demand methods.

Three scenarios were considered: a baseline steel production case, a renewable electricity scenario reflecting the projected Spanish mix, and a 100% wind-powered scenario. Additional analyses addressed technological contributions, historical emission trends, and seasonal variability in renewable electricity generation across Spain.

The findings reveal that replacing conventional electricity with renewable sources substantially reduces greenhouse gas emissions, primary energy demand, and impacts on human health, ecosystems, and resource depletion. The wind-based scenario achieved the best overall environmental performance. Moreover, the comparison between Sphera GaBi and SimaPro showed consistent environmental trends, with quantitative differences arising from methodological features specific to each platform.

Taken together, these results underscore the potential of renewable electrification as an effective strategy to mitigate environmental impacts and promote the decarbonization of energy-intensive industrial systems.

1. Introducción

En las últimas décadas, las necesidades a nivel mundial por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar los efectos del cambio climático, están directamente relacionadas con el sector eléctrico, ya que, este sector continúa siendo una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial, especialmente en regiones con alta dependencia de los combustibles fósiles, como lo es la Unión Europea [1], [2].

En respuesta a esto, las energías renovables se consolidan como una fuente de generación eléctrica con menor impacto ambiental, tecnologías como la energía eólica, la solar fotovoltaica, la hidráulica, la solar térmica o la biomasa permiten producir electricidad de manera más limpia, aportando directamente a la descarbonización del sistema energético [3], [4], [5].

España se posiciona actualmente como uno de los países europeos con mayor expansión y uso de energías renovables en su sistema eléctrico. Según datos de Red Eléctrica de España (REE) [6] el año 2025 las energías renovables representaron el 55,5% de la generación eléctrica nacional, alcanzando una producción renovable superior a 150.988 GWh, demostrando un crecimiento hacia un modelo energético más limpio y eficiente [7], [8].

Este crecimiento ha sido impulsado por la ampliación de la energía eólica y solar fotovoltaica, junto con el desarrollo de políticas energéticas orientadas a la descarbonización, avances tecnológicos y compromisos internacionales en materia de sostenibilidad [7].

Sin embargo, aunque las energías renovables poseen evidentes ventajas en reducción de emisiones, es esencial evaluar todos los impactos ambientales a lo largo de todo su ciclo de vida. La fabricación de componentes, la extracción de materiales y los procesos asociados al transporte y mantenimiento pueden generar efectos ambientales significativos que deben de considerarse [2],[3].

Así, el análisis de ciclo de vida (ACV) se usa como una herramienta fundamental para evaluar los impactos ambientales de los sistemas energéticos, considerando todas las etapas del proceso, desde la extracción de materias primas hasta la generación eléctrica. Esta metodología permite comparar de forma objetiva las diferentes tecnologías y evaluar su aporte real a la sostenibilidad del sistema energético [9], [10], [11].

El presente trabajo analiza la evaluación ambiental de diferentes escenarios del mix español eléctrico para el año 2025, aplicados a un sistema productivo de acero. Se emplean datos reales de producción eléctrica en España y bases de datos reconocidas a nivel internacional como *ecoinvent* 3.11, para garantizar representatividad y consistencia del modelado. Para ello, se desarrollan tres escenarios energéticos basados en un caso base, un mix eléctrico renovable español 2025 y un escenario controlado 100% eólico.

La evaluación se realiza mediante la metodología de análisis de ciclo de vida ACV utilizando la herramienta de software *Sphera GaBi* para la modelización escenarios analizados. Con el fin de evaluar la influencia de la herramienta empleada en los resultados, se comparan los resultados obtenidos en *Sphera GaBi* con resultados desarrollados en *SimaPro*, para escenarios basados en conjuntos de datos y condiciones de modelado comparables. El análisis incluye indicadores de impacto ambiental relacionados con cambio climático, demanda de energía primaria y categorías presentes en *ReCiPe Endpoint*. También, la contribución individual de cada tecnología de energía renovable (eólica, solar, fotovoltaica, hidráulica, solar térmica y biomasa), evaluando tanto el efecto del mix eléctrico como la influencia de la herramienta de software en los resultados finales [12], [13].

Adicionalmente, se estudia la evolución temporal de las emisiones y su relación con la estructura del mix energético, considerando análisis mensuales, estacionales e interanuales [6], [7], [8].

Por último, este trabajo se realiza con el fin de enriquecer el análisis de la sostenibilidad de los sistemas eléctricos renovables y fortalecer la evaluación metodológica de las herramientas de ACV empleadas en estudios energéticos y ambientales.

1.1. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El presente trabajo se alinea directamente con la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, contribuyendo a los objetivos de energía sostenible, acción climática, producción responsable e innovación tecnológica. Específicamente, se relaciona con los ODS 7, 9 y 13, los cuales abordan la energía asequible y no contaminante; la industria, innovación e infraestructura; y la acción por el clima, respectivamente [14], [15], [16]. La integración de estos objetivos se refleja en la evaluación ambiental del mix eléctrico renovable español del año 2025, demostrando cuantitativamente cómo la incorporación de las tecnologías eólica, solar fotovoltaica e hidráulica mitiga las emisiones de gases de efecto invernadero y reduce la demanda de energía primaria, fomentando la descarbonización del sistema energético. Asimismo, la aplicación de metodologías

de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) mediante herramientas de software especializadas como *Sphera GaBi* permite evaluar de forma objetiva el desempeño ambiental global de dichos sistemas. La comparación entre escenarios y herramientas metodológicas fortalece la confiabilidad de los estudios ambientales en el sector energético, aportando información clave para futuras estrategias de planificación alineadas con las metas globales de sostenibilidad.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es cuantificar, mediante el análisis de ciclo de vida (ACV), los impactos ambientales asociados a la producción de 1 kWh de electricidad de España bajo un escenario basado exclusivamente en fuentes de energías renovables.

2.2 Objetivos específicos

- Construir un modelo del mix eléctrico español compuesto únicamente por fuentes de energías renovables, incluyendo las tecnologías eólicas, solar fotovoltaica, hidráulica, solar térmica y biomasa.
- Evaluar la contribución de las tecnologías de energías renovables en el impacto ambiental de todo el sistema eléctrico español mediante análisis de ciclo de vida.
- Evaluar y comparar los impactos ambientales asociados a los diferentes escenarios estudiados mediante indicadores de *Climate Change*, *Primary Energy Demand* y categorías *ReCiPe Endpoint*.
- Analizar los resultados obtenidos entre *Sphera GaBi* y *SimaPro*, bajo condiciones de modelado comparables para evaluar la influencia de la herramienta utilizada.
- Analizar la evolución temporal de los impactos ambientales y su relación con la variabilidad mensual, estacional e interanual del mix energético renovable.

En conjunto, estos objetivos permiten establecer una base metodológica sólida para comprender el desempeño ambiental del sistema eléctrico español y su potencial de descarbonización en el contexto de la transición energética.

3. Marco teórico

3.1. Análisis de ciclo de vida en sistemas energéticos.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta utilizada para evaluar los impactos ambientales asociados a un producto, proceso o sistema a lo largo de todas las etapas de su existencia. Esta metodología se encuentra regulada por las normas ISO 14040 e ISO 14044, las cuales establecen la estructura metodológica para la ejecución de estudios de ACV [9],[10].

El ACV se estructura en cuatro etapas principales: la definición de objetivos y alcance (*Goal and Scope*), el análisis de inventario del ciclo de vida (*Life Cycle Inventory, LCI*), la evaluación de impactos del ciclo de vida (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*) y la interpretación de resultados. Estas fases se representan de forma esquemática en la **Figura 1**.

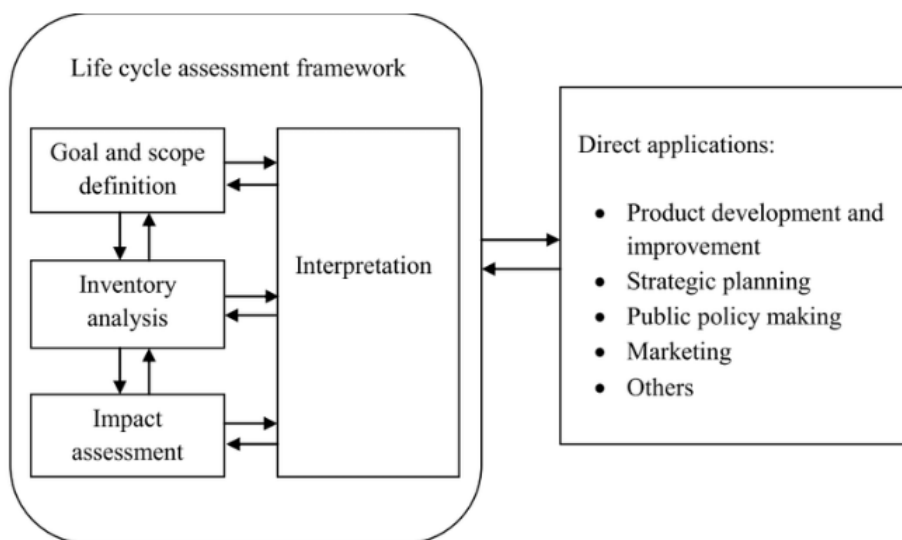


Figura 1. Fases de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) adaptado de ISO 14040 [9].

La fase de objetivo y alcance determina la finalidad del estudio, la unidad funcional, los límites del sistema y las hipótesis metodológicas. La unidad funcional se define como la referencia cuantitativa que permite normalizar las entradas y salidas de flujos materiales y energéticos, garantizando la comparabilidad de los resultados. Los límites del sistema establecen que etapas del ciclo de vida se incluyen en el análisis, pudiendo adoptar enfoques comunes como de la cuna a la tumba (*cradle-to-grave*), que abarca desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, o de la cuna a la puerta (*cradle-to-gate*), centrado en los procesos hasta la salida del producto de la planta de producción.

La fase de análisis de inventario consiste en recopilar y cuantificar las entradas y salidas del sistema, incluyendo tanto el consumo energético, como los materiales, las emisiones atmosféricas, la generación de residuos y otros flujos ambientales relevantes [9].

La evaluación de impactos transforma los flujos del inventario en indicadores ambientales mediante métodos de caracterización. En estudios energéticos, las categorías más empleadas incluyen cambio climático, acidificación, eutrofización y agotamiento de recursos [3], [9], [10], [11].

Los resultados obtenidos mediante ACV pueden verse afectados por diferentes fuentes de incertidumbre, relacionadas a la calidad y disponibilidad de los datos las hipótesis de modelado, la definición de límites del sistema, la selección de bases de datos y los métodos de evaluación empleados. Estas variaciones pueden influir en los resultados finales y explicar diferencias observadas entre estudios o herramientas de software distintas. Por ello, la interpretación de los resultados debe considerar los valores obtenidos y las limitaciones inherentes a la metodología y a los datos utilizados [3], [17], [18].

Finalmente, la etapa de interpretación permite analizar la consistencia de los resultados e identificar las principales contribuciones ambientales del sistema evaluado y establecer conclusiones orientadas a la toma de decisiones [9], [10].

Diferentes estudios han demostrado la importancia del ACV en sistemas energéticos, demostrando que tecnologías renovables como la energía eólica pueden presentar emisiones inferiores a 20 g CO₂ eq/kWh, [19] mientras que tecnologías solares fotovoltaicas pueden variar entre 40 y 80 g CO₂ eq/kWh [2] dependiendo de la tecnología y del mix eléctrico utilizado durante su fabricación [3],[4][5].

Esto demuestra la necesidad de evaluar el desempeño ambiental de las tecnologías renovables considerando todas las etapas de su ciclo de vida y no únicamente la fase de operación. Solo mediante una evaluación integral es posible determinar su verdadera contribución a la sostenibilidad y a la descarbonización del sistema energético [3], [5].

3.2. Energía eólica

La energía eólica ha sido analizada mediante la metodología ACV, debido a sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con tecnologías basadas en combustibles fósiles.

Una recopilación de estudios de ACV aplicados a sistemas eólicos terrestres (*onshore*), reportan emisiones medias cercanas a 12 g CO₂ eq/kWh, [19], [20] valores inferiores a los observados en tecnologías fósiles convencionales.

Por otra parte, estudios comparativos sobre tecnologías renovables señalan que la energía eólica presenta uno de los menores impactos ambientales dentro de los sistemas de generación eléctrica, especialmente durante la fase de operación, donde las emisiones directas son prácticamente nulas debido a la ausencia de procesos de combustión [3], [19], [21], [22].

Sin embargo, los principales impactos ambientales asociados a esta tecnología se concentran en las etapas de fabricación, transporte e instalación de los aerogeneradores. Diversos autores identifican que la producción de acero, hormigón, cobre y materiales compuestos utilizados en torres, cimentaciones, generadores y palas representan la mayor contribución al impacto ambiental total del sistema eólico [20], [23]. Estos impactos están asociados principalmente al consumo de materiales y energía requerido para la construcción de la infraestructura necesaria para la generación eléctrica.

Así mismo, investigaciones recientes han evaluado estrategias de reciclaje y valorización de palas eólicas al final de su vida útil, evidenciando el potencial de la economía circular para reducir impactos asociados a residuos compuestos y mejorar la sostenibilidad global del sistema energético [24].

Aunque la fase de operación genera impactos mínimos, el análisis integral del ciclo de vida demuestra cuales con las etapas que concentran mayor carga ambiental. Evaluar el sistema en su totalidad permite comprender la verdadera contribución a la sostenibilidad y a la descarbonización del sector energético [3], [4], [5].

3.3. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica requiere un uso intensivo de materias primas y recursos minerales debido al uso de silicio, cobre, vidrio y plata durante la fabricación de módulos y componentes eléctricos.

Estudios de ACV reportan emisiones comprendidas entre 40 y 80 g CO₂ eq/kWh para sistemas fotovoltaicos, dependiendo de la tecnología empleada, la eficiencia del módulo y el mix eléctrico utilizado durante su fabricación [3], [21].

Igualmente, diversos autores identifican que la etapa de fabricación de módulos fotovoltaicos representa el principal impacto ambiental total del sistema, por su alto consumo energético requerido en la producción y procesamiento de materiales semiconductores [21], [25], [26].

En este sentido, el análisis de estrategias de reciclaje y recuperación de materiales provenientes de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil, demuestran que la economía circular puede reducir impactos ambientales y recuperar materiales de valor [26], [27].

Por otro lado, en el estudio realizado por Ihoume et al. (2026) [25] destaca la importancia de la transparencia metodológica y de la correcta definición de límites del sistema en estudios de ACV fotovoltaico, con el objetivo de garantizar la comparabilidad y consistencia de resultados entre diferentes investigaciones.

Durante la etapa de operación, los sistemas fotovoltaicos presentan emisiones directas prácticamente nulas. Sin embargo, cuando se consideran todas las etapas del ciclo de vida, los impactos ambientales están dominados por la fabricación de módulos, la extracción de materias primas y la gestión al final de la vida útil. Por ello, la evaluación ambiental de esta tecnología debe realizarse desde una perspectiva integral que contemple todas las etapas del ciclo de vida del sistema [3], [4], [5].

3.4. Energía solar térmica.

La energía solar térmica de concentración (CSP) presenta como principal ventaja la posibilidad de integrar sistemas de almacenamiento térmico, lo que permite almacenar energía en forma de calor y suministrar electricidad cuando la disponibilidad del recurso solar disminuye, mejorando la gestión del sistema eléctrico [28].

Desde la perspectiva del ACV, las emisiones del ciclo de vida de los sistemas CSP varían de acuerdo con la tecnología empleada, el sistema de almacenamiento seleccionado y las condiciones de operación del sistema.

En el estudio realizado por Vielma et al. (2026) [29], se demuestra que la selección de materiales utilizados en los sistemas de almacenamiento térmico puede modificar de forma significativa los impactos ambientales asociados a estas instalaciones, al comparar sistemas convencionales con alternativas basadas en escorias siderúrgicas utilizadas como material de almacenamiento energético, demostrando el potencial para reducir la huella ambiental del almacenamiento térmico.

Por otro lado, la revisión realizada por Longo et al. (2025) [28] sobre sistemas CSP y CPV identifican que los principales impactos ambientales de estas tecnologías se concentran en las etapas de fabricación y construcción, debido al elevado consumo de acero, vidrio y sales térmicas utilizadas en colectores, estructuras y sistemas de almacenamiento.

Durante la etapa de operación, las tecnologías CSP presentan emisiones directas bajas en comparación con los sistemas convencionales basados en combustibles fósiles. Sin embargo, el análisis del ciclo de vida demuestra que las etapas de construcción, fabricación de materiales y desarrollo de sistemas de almacenamiento térmico concentran la mayor parte de las cargas ambientales. Por ello, su evaluación debe abordarse desde una perspectiva completa, que permita valorar su verdadero potencial de sostenibilidad dentro del sistema energético [4], [5], [28].

3.5. Energía hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica presenta bajas emisiones directas durante la fase de operación; sin embargo, los estudios de análisis de ciclo de vida ACV identifican los impactos ambientales asociados a la construcción de infraestructuras, la fabricación de materiales y los efectos derivados de los embalses, entre los que destacan las emisiones de metano por descomposición de materia orgánica y las alteraciones sobre los ecosistemas acuáticos; estas emisiones pueden intensificarse en regiones tropicales, donde las condiciones climáticas favorecen a la degradación de materia orgánica en embalses, generando emisiones adicionales de metano asociadas al almacenamiento de agua [30].

Mediante una revisión de estudios de análisis de ciclo de vida aplicados a sistemas hidroeléctricos, Gemechu et al. (2022) [30] reportan emisiones que pueden variar desde valores inferiores a 10 g CO₂ eq/kWh hasta más de 100 g CO₂ eq/kWh, dependiendo de la central hidroeléctrica, características del embalse y las condiciones geográficas del sistema.

Por otra parte, estudios desarrollados por Geller et al. (2016) [31] de Albuquerque et al. (2025) [32] identifican que las principales contribuciones al impacto ambiental se concentran en la fase de construcción, especialmente por el consumo de hormigón, acero y movimientos de tierra requeridos para la infraestructura.

En consecuencia, aunque la energía hidroeléctrica presenta menores emisiones respecto a tecnologías fósiles convencionales, sus impactos ambientales no son nulos cuando se consideran todas las etapas del ciclo de vida. Entre estos impactos destacan las emisiones asociadas a la fase

de operación de los embalses, que deben incorporarse en una evaluación ambiental integral para reflejar con precisión la sostenibilidad de esta tecnología [5], [30].

3.6. Energía biomasa

La generación eléctrica a partir de biomasa y biogás presenta un comportamiento ambiental más variable que otras tecnologías renovables, debido a su dependencia del tipo de biomasa utilizada, los procesos de conversión energética y la logística asociados al transporte y tratamiento del recurso.

En el estudio realizado por Kadiyala et al. (2016) [33] reportan emisiones de gases de efecto invernadero comprendidas entre 20 y más de 200 g CO₂ eq/kWh para diferentes sistemas de generación eléctrica basados en biomasa, dependiendo principalmente del tipo de materia prima empleada, el consumo energético del proceso y las distancias de transporte.

Los autores señalan que los sistemas basados en residuos agrícolas o forestales presentan menores impactos ambientales en comparación con cultivos energéticos dedicados, debido a la reducción de emisiones asociadas al cambio de uso del suelo y al consumo de fertilizantes [33].

Por otro lado, el análisis de ciclo de vida aplicado a sistemas de bioenergía permite evaluar los impactos relacionados a la gestión de residuos biológicos, las emisiones derivadas de procesos de digestión anaerobia y aprovechamiento energético de subproductos orgánicos [11].

En general, el desempeño ambiental de la biomasa depende de la eficiencia tecnológica del sistema y de la correcta gestión de recursos y emisiones asociadas al ciclo de vida del proceso.

3.7. Síntesis del desempeño tecnológico

De forma general, los estudios de análisis de ciclo de vida aplicados a tecnologías renovables coinciden en que éstas presentan impactos ambientales inferiores a los de las tecnologías convencionales basadas en combustibles fósiles, especialmente durante la fase de operación, donde las emisiones directas de gases de efecto invernadero son reducidas o prácticamente nulas. Sin embargo, cuando se consideran todas las etapas del ciclo de vida, los impactos ambientales aumentan debido a los procesos de extracción de materias primas, fabricación de componentes, construcción de infraestructuras, transporte e instalación de los sistemas energéticos. En consecuencia, la aplicación del ACV resulta fundamental para evaluar de forma integral el desempeño ambiental de las tecnologías renovables e identificar los procesos y materiales que contribuyen en mayor medida a sus impactos ambientales [1], [3], [21].

4. Metodología

4.1. Metodología de análisis de ciclo de vida y software empleado.

El presente estudio se desarrolló mediante la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), siguiendo los métodos establecidos por las normas ISO 14040 [9] e ISO 14044 [10], las cuales definen las etapas de definición de objetivo y alcance (*Goal and Scope*), análisis de inventario de ciclo de vida (LCI), evaluación de impactos ambientales (LCIA) e interpretación de resultados.

El modelado del sistema energético se realizó utilizando el software *Sphera GaBi* [34], empleando la base de datos *ecoinvent versión 3.11 + integrated CUP 2025* bajo el enfoque *cut-off* [35]. Este enfoque asigna las cargas ambientales al sistema productivo original, evitando la doble contabilización de impactos asociados a procesos de reciclaje y reutilización de materiales.

La base de datos *ecoinvent* constituye unas de las fuentes de inventario ambiental más utilizada a nivel internacional en estudios de ACV, debido a su consistencia metodológica, cobertura geográfica y transparencia documental. En este estudio se seleccionaron *datasets* de tipo agregados (*aggregated dataset*), los cuales integran múltiples procesos asociados a cadenas de suministro completas [35].

En particular, el *dataset* de referencia “*electricity, high voltage, production mix Spain*” representa el sistema eléctrico español de alta tensión e incorpora de forma agregada los procesos asociados a las distintas tecnologías de generación eléctrica presentes en el mix nacional. Este *dataset* incluye de manera implícita etapas relacionadas con extracción y procesamiento de materias primas, fabricación de componentes e infraestructuras, transporte, instalación, operación y mantenimiento de las tecnologías de generación eléctrica.

Para el análisis comparativo aplicado al sistema productivo de acero se utilizó el *dataset* “*steel production, electric, low-alloyed Europe without Switzerland and Austria*” de *ecoinvent* 3.11, correspondiente a producción de acero de baja aleación mediante horno eléctrico de arco (*Electric Arc Furnace, EAF*).

Finalmente, se desarrolló una comparación metodológica entre las herramientas de software *Sphera GaBi* y *SimaPro* bajo condiciones de modelado equivalentes, con el objetivo de evaluar la coherencia metodológica y las tendencias ambientales generales obtenidas mediante diferentes herramientas de análisis de ciclo de vida.

4.2. Obtención de datos del sistema eléctrico español (REE)

Los datos de generación eléctrica renovable utilizados en este estudio fueron obtenidos a partir de la plataforma oficial de Red Eléctrica de España (REE) [6], específicamente del apartado correspondiente a la estructura de generación eléctrica nacional para el año 2025.

La información recopilada incluye datos anuales de generación eléctrica de las principales tecnologías renovables como energía eólica, solar fotovoltaica, hidráulica, solar térmica y biomasa. Posteriormente, los datos fueron organizados y procesados con el fin de calcular la participación relativa de cada tecnología dentro del mix eléctrico renovable español empleado en el modelo de ACV.

En la **Tabla 1** se presenta la distribución de generación eléctrica renovable correspondiente al sistema eléctrico español para el año 2025, expresada en valores absolutos (GWh), y en porcentaje de participación relativa de cada tecnología dentro del total de generación renovable nacional.

Tabla 1. Distribución de generación eléctrica renovable en España para el año 2025 [6].

Tecnología energética	Generación anual absoluta (GWh)	Participación sobre el mix renovable (%)
Eólica	58.800,8	38,9%
Solar fotovoltaica	50.187,7	33,2%
Hidráulica	33.684,5	22,3%
Otras renovables	3.900,1	2,6%
Solar térmica	3.681,9	2,4%
Residuos renovables	711,5	0,5%
Hidroeólica	21,9	0,1%
Generación Renovable Total	150.988,4	100,0%

4.3. Selección de *datasets* y modelado del mix eléctrico renovable

El modelado del mix eléctrico renovable español se realizó utilizando *datasets* específicos de *ecoinvent* 3.11 asociados al sistema “*electricity, high voltage, production mix Spain*”.

Este *dataset* agregado “*electricity, high voltage, production mix Spain*” fue utilizado como referencia metodológica principal, ya que, representa el sistema eléctrico español e integra diferentes tecnologías de generación eléctrica presentes dentro del mix nacional. A partir de esta estructura, se seleccionaron *datasets* individuales representativos de las principales tecnologías renovables utilizadas en España.

La **Tabla 2** resume los procesos empleados para cada tecnología y su correspondencia dentro del modelo desarrollado.

Tabla 2. *Datasets* de *ecoinvent* 3.11 utilizados para la construcción del mix eléctrico renovable español.

Tecnología	Dataset seleccionado
Eólica	"Electricity production, wind, 1–3 MW turbine, offshore, ES"
Eólica	"Electricity production, wind, 1–3 MW turbine, onshore, ES"
Eólica	"Electricity production, wind, <1 MW turbine, onshore, ES"
Eólica	"Electricity production, wind, >3 MW turbine, onshore, ES"
Solar fotovoltaica	"Electricity production, photovoltaic, 570 kWp open ground installation"
Hidroeléctrica	"Electricity production, hydro, pumped storage, ES"
Hidroeléctrica	"Electricity production, hydro, reservoir, non-alpine region, ES"
Hidroeléctrica	"Electricity production, hydro, run-of-river, ES"
Solar térmica	"Electricity production, solar thermal parabolic trough, 50 MW, ES"
Solar térmica	"Electricity production, solar tower power plant, 20 MW, ES"
Biomasa	"Heat and power co-generation, biogas, gas engine, ES"
Biomasa	"Heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014, ES"

Para la energía eólica, se seleccionaron diferentes configuraciones de generación terrestre (*onshore*) y marina (*offshore*), con distintas capacidades de potencia, con el objetivo de representar la diversidad tecnológica existente en el sistema eléctrico español.

En el caso de la energía solar fotovoltaica, se empleó el proceso “*electricity production, photovoltaic, 570 kWp open ground installation*”. Aunque este proceso no se encuentra explícitamente desagregado dentro del *dataset* original de “*electricity, high voltage, production mix Spain*”, fue seleccionado por considerarse representativo de instalaciones fotovoltaicas de escala industrial conectadas a red, que constituyen una parte significativa de la capacidad

fotovoltaica instalada en España. La elección de este *dataset* se basó en la necesidad de representar sistemas de generación a gran escala compatibles con la estructura del mix eléctrico nacional, evitando procesos asociados a instalaciones residenciales o de pequeña potencia que no reflejan adecuadamente las características del sistema eléctrico español. Además, la elevada participación de la energía solar fotovoltaica en el escenario español proyectado para 2025 (33 %) justificó su incorporación específica dentro del modelo renovable desarrollado [6].

Para la energía hidroeléctrica, se utilizaron diferentes procesos de generación que incluyen sistemas de embalse, centrales de bombeo y centrales de agua fluyente. La elección de estos procesos permitió representar las principales tipologías hidroeléctricas presentes en España, considerando sistemas de almacenamiento como tecnologías dependientes directamente del régimen hidrológico.

En el caso de la energía solar térmica se seleccionaron los procesos que corresponden a tecnologías de concentración solar de tipo cilindro-parabólico y torre solar, ampliamente implantadas en España y representativas de las configuraciones predominantes de generación solar térmica utilizadas en el país.

Finalmente, para biomasa se utilizaron los procesos que representan sistemas de cogeneración basados en biogás y biomasa sólida, las cuales reflejan las rutas de aprovechamiento energético presentes en el sistema energético español, considerando tecnologías para la producción conjunta de calor y electricidad.

En conjunto, la selección de estos procesos permitió construir un modelo representativo del sistema eléctrico renovable español manteniendo coherencia metodológica con la estructura del *dataset* agregado “*electricity, high voltage, production mix Spain*” de *ecoinvent* 3.11.

4.4. Normalización del mix eléctrico renovables

Con el objetivo de adaptar los datos de generación eléctrica a la unidad funcional definida en el estudio (1 kWh de electricidad renovable), se realizó un proceso de normalización del mix eléctrico renovable español.

En primer lugar, se recopilaron los valores de generación eléctrica anual por tecnología expresados en GWh, obtenidos a partir de la Red Eléctrica de España (REE) [6]. Posteriormente, se calculó la participación relativa de cada tecnología respecto al total de generación renovables nacional.

Debido a la baja participación individual de algunas categorías como residuos renovables, otras renovables y biogás, estas fueron agrupadas dentro de una única categoría de biomasa/biogás con el fin de simplificar el modelado del sistema energético.

La normalización del mix eléctrico se realizó mediante la siguiente **ecuación (1)**:

$$P_{norm,i} = \frac{G_{ren,i}}{G_{ren,total}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- $P_{norm,i}$ es la participación normalizada de la tecnología renovable i en el mix.
- $G_{ren,i}$ representa la generación eléctrica anual de la tecnología i (MWh/año).
- $G_{ren,total}$ corresponde a la generación eléctrica anual total acumulada por todas las tecnologías renovables consideradas en el estudio (MWh/año).

Este procedimiento permite expresar la contribución de cada tecnología de manera que la suma total del sistema equivaliera a 1 KWh de electricidad renovable.

Los valores normalizados utilizados en el modelado del mix eléctrico se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Participación normalizada de tecnologías renovables utilizadas en el modelado del mix eléctrico español [6].

Tecnología renovable	Participación de energía ($P_{norm,i}$)
Eólica	0,3894
Solar fotovoltaica	0,3324
Hidráulica	0,2231
Solar Térmica	0,0244
Biomasa / biogás	0,0307

De esta forma, el mix eléctrico se integró en el modelo de análisis de ciclo de vida como una combinación ponderada de tecnologías renovables representativas del sistema eléctrico español.

4.5 Unidad Funcional y Límites del Sistema

Como ya se ha comentado anteriormente, la unidad funcional definida para el modelado del mix eléctrico renovable corresponde a la producción de 1 kWh de electricidad renovable suministrada a la red eléctrica española durante el año 2025.

Para el caso de estudio comparativo aplicado al sistema productivo de acero, la unidad funcional corresponde a la producción de 1 kg de acero de baja aleación producido mediante horno eléctrico de arco (*Electric Arc Furnace, EAF*), utilizando el *dataset* “*steel production, electric, low-alloyed Europe without Switzerland and Austria*” de *ecoinvent* 3.11. Este *dataset* representa un sistema siderúrgico basado en ruta eléctrica, con elevada dependencia del consumo energético asociado al suministro de electricidad.

En el caso del mix eléctrico renovable, el sistema fue definido bajo un enfoque *cradle-to-grid*, que incluye las etapas de extracción y procesamiento de materias primas, fabricación de componentes e infraestructuras energéticas, transporte, instalación, operación y mantenimiento de las tecnologías renovables evaluadas, hasta el suministro de electricidad a la red.

Por otro lado, el análisis aplicado al sistema de producción de acero se desarrolló bajo un enfoque *cradle-to-gate*, de acuerdo con los límites definidos en el *dataset* original de *ecoinvent* 3.11 [35] este contexto, el sistema incluye las etapas asociadas a la obtención de materias primas, los procesos productivos y el consumo energético requerido para la producción del acero, excluyendo las etapas posteriores de uso y fin de vida del producto.

Durante el desarrollo de escenarios comparativos, se realizó la sustitución y reorganización de los flujos de entrada asociados al consumo eléctrico del *dataset* de acero, manteniendo constante la estructura productiva original del proceso siderúrgico.

Se excluyeron del análisis la infraestructura de transmisión y distribución eléctrica, el consumo final de electricidad fuera del sistema productivo y las etapas de desmantelamiento de instalaciones energéticas.

4.6 Desarrollo de escenarios comparativos

Con el objetivo de evaluar la coherencia metodológica y las tendencias ambientales obtenidas mediante diferentes herramientas de análisis de ciclo de vida (ACV), se desarrolló un caso de estudio comparativo utilizando las herramientas de software *Sphera GaBi* y *SimaPro* a partir del *dataset* “*steel production, electric, low-alloyed Europe without Switzerland and Austria*” de *ecoinvent* 3.11.

El estudio se estructuró mediante tres escenarios energéticos diferentes, manteniendo constantes la unidad funcional, los límites del sistema y la estructura general del proceso productivo de acero, como se resumen en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Resumen de los escenarios evaluados.

Escenario	Descripción	
Escenario 1	Acero original	Producción de acero mediante horno eléctrico de arco utilizando el <i>dataset</i> original de <i>ecoinvent</i> 3.11.
Escenario 2	Acero + mix renovable español	Producción de acero utilizando el mix eléctrico renovable español 2025 desarrollado en este estudio.
Escenario 3	Acero + mix eólico	Producción de acero utilizando un mix eléctrico basado exclusivamente en energía eólica.

Escenario 1: Caso base

El primer escenario corresponde al *dataset* original “*steel production, electric, low-alloyed Europe without Switzerland and Austria*” de *ecoinvent* 3.11, La unidad funcional considerada para este escenario fue 1 kg de acero producido, manteniendo sin modificaciones su estructura interna original. Este escenario se utilizó como referencia inicial para la comparación de resultados ambientales entre los diferentes escenarios energéticos y plataformas de ACV.

Escenario 2: Producción de acero con mix eléctrico renovable español 2025

En el segundo escenario consistió en sustituir el suministro eléctrico del proceso de producción de acero por el mix eléctrico renovable español desarrollado previamente. Para ello, se reemplazó el flujo de entrada de electricidad definido en el *dataset* original “*steel production, electric, low-alloyed*” de *ecoinvent* 3.11, manteniendo inalterados el resto de los flujos de entrada y salida del sistema.

El mix eléctrico español renovable fue modelado para la generación de 1 kWh de electricidad a partir de tecnologías representativas del sistema eléctrico español proyectado para 2025 [6], incluyendo energía eólica, solar fotovoltaica, solar térmica, hidráulica y biomasa. La modelización se realizó empleando *datasets* específicos de *ecoinvent* 3.11 asociados a cada tecnología de generación.

La cantidad de electricidad consumida por el proceso siderúrgico se mantuvo constante respecto al escenario base (Escenario 1), por lo que la única modificación introducida correspondió al origen de la electricidad utilizada durante la producción. De este modo, fue posible evaluar de forma aislada la influencia de un suministro eléctrico renovable sobre el desempeño ambiental del sistema.

La unidad funcional del sistema siderúrgico se mantuvo en 1 kg de acero producido, mientras que el sistema eléctrico fue modelado con una unidad funcional de 1 kWh de electricidad generada.

Escenario 3: Producción de acero con mix eléctrico 100% eólico.

El tercer escenario consistió en sustituir, el flujo de entrada correspondiente al consumo de electricidad del proceso de producción de acero por el mix eléctrico 100% eólico desarrollado previamente en la Sección 4.3, manteniendo constantes las demás condiciones del sistema.

El sistema eléctrico eólico fue modelado para la generación de 1 kWh de electricidad, integrando tecnologías eólicas terrestres (*onshore*) y marinas (*offshore*) representativas del contexto europeo y español. Posteriormente, dicho flujo eléctrico fue acoplado al proceso siderúrgico de referencia para la producción de 1 kg de acero.

Al igual que en el escenario anterior, se mantuvo constante la cantidad de electricidad consumida por el proceso siderúrgico y no se realizaron modificaciones adicionales en la estructura productiva original. De este modo, la única variación introducida respecto al escenario base fue el origen de la electricidad utilizada durante el proceso de producción de acero.

La sustitución del suministro eléctrico permitió evaluar la influencia de un escenario basado exclusivamente en energía eólica sobre el desempeño ambiental del sistema siderúrgico, manteniendo inalterados el resto de los flujos de entrada y salida definidos en el *dataset* original.

El escenario fue modelado bajo condiciones metodológicas equivalentes tanto en *Sphera GaBi* como en *SimaPro*, garantizando consistencia en términos de unidad funcional, límites del sistema, métodos de evaluación de impacto y estructura general del proceso productivo.

No obstante, debido a diferencias internas en la configuración de procesos eléctricos, regionalización de inventarios y disponibilidad de *datasets* de cada herramienta de software, fue necesario realizar ajustes específicos en los flujos de suministro eléctrico con el fin de preservar la coherencia interna del modelado [36].

Para el caso de *Sphera GaBi*, se empleó el proceso equivalente disponible dentro de la base de datos “*RER- Electricity, médium voltage, european attribute mix market*”, representante del suministro eléctrico asociado al proceso siderúrgico.

Por esta razón, la comparación se planteó principalmente desde una perspectiva metodológica orientada al análisis de tendencias ambientales generales, más que como una comparación de equivalencia numérica absoluta entre plataformas [36].

Aunque el *dataset* original de producción de acero utilizado en *ecoinvent* 3.11 corresponde a un sistema *cradle-to-gate*, las modificaciones realizadas en este estudio se centraron específicamente en la sustitución del suministro eléctrico asociado al proceso productivo.

Por ende, el análisis comparativo desarrollado en *Sphera GaBi* y *SimaPro* se enfocó principalmente en evaluar la influencia del sistema eléctrico sobre el desempeño ambiental del proceso siderúrgico, bajo una aproximación de tipo *gate-to-gate* aplicada al consumo energético del sistema, manteniendo inalteradas las restantes etapas del sistema de producción de acero.

4.7 Métodos de evaluación de impacto ambiental

Para el análisis de impactos ambientales se utilizaron los siguientes métodos de evaluación

- *IPCC AR5 GWP100* (incluyendo *Climate-carbon feedback* y excluyendo carbono biogénico), utilizado para cuantificar emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en kg CO₂ equivalente [2].
- *ReCiPe Endpoint (H)*, empleado para evaluar impactos ambientales agregados relacionados con salud humana (medido en *DALYs*, *disability-adjusted life years*), calidad de los ecosistemas (medidos en la desaparición de especies a lo largo del tiempo) y agotamiento de recursos (medido en costos excedentes para el futuro) [37].
- *Primary Energy Demand*, utilizado para cuantificar la demanda total de energía primaria asociada al sistema evaluado, considerando recursos renovables y no renovables.

La combinación de estos métodos permitió analizar categorías específicas de impacto ambiental como indicadores agregados de sostenibilidad y consumo energético, proporcionando una visión comparativa y coherente del desempeño ambiental de los diferentes escenarios modelados.

4.8 Análisis temporal de generación renovable y emisiones de CO₂ equivalente

Se realizó un análisis temporal del comportamiento del sistema eléctrico español utilizando información proporcionada por Red Eléctrica de España (REE) [6].

En primer lugar, se analizó la evolución mensual de la generación eléctrica renovable correspondiente al año 2025, considerando tecnologías como energía eólica, solar fotovoltaica, hidráulica, solar térmica y biomasa. Los datos fueron organizados por estaciones del año (invierno, primavera, verano y otoño) con el objetivo de evaluar la variabilidad estacional de la generación renovable en España.

Asimismo, se analizó un histórico de las emisiones de CO₂ equivalente asociadas al sistema eléctrico español, utilizando información correspondiente a los años, 2014, 2015, 2024 y el escenario proyectado para 2025, elaborada a partir de la evolución de la estructura de generación eléctrica nacional reportada por Red Eléctrica de España [6], [7], [38].

La comparación temporal permitió analizar la evolución del sistema eléctrico español en criterios de descarbonización y aumento de participación de tecnologías renovables dentro del mix energético nacional.

5. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de ciclo de vida (ACV) aplicado a los diferentes escenarios energéticos evaluados. Los resultados se analizan considerando indicadores de *IPCC 2013 GWP100a*, *ReCiPe Endpoint (H)* y *Primary Energy Demand (CED-LHV)*, permitiendo evaluar impactos específicos relacionados con cambio climático como los impactos agregados asociados a salud humana, ecosistemas, agotamiento de recursos y demanda de energía acumulada.

Asimismo, se evaluó la influencia de diferentes configuraciones del suministro eléctrico sobre el desempeño ambiental del sistema de producción de acero mediante horno eléctrico de arco (EAF), utilizando escenarios energéticos desarrollados a partir de *datasets* de *ecoinvent* 3.11.

Finalmente, se realizó una comparación metodológica entre las herramientas de software *Sphera GaBi* y *SimaPro* con el objetivo de evaluar la coherencia general de tendencias ambientales obtenidas bajo condiciones de modelado equivalentes, identificando posibles diferencias debido a la estructura interna de cada plataforma y de la regionalización de inventarios.

5.1 Resultados del análisis de ciclo de vida

5.1.1 Impacto en cambio climático (IPCC GWP100)

La **Tabla 5** presenta los resultados obtenidos para el indicador de cambio climático expresado en kg CO₂ equivalente mediante el método *IPCC 2013 GWP100a*.

En los sistemas eléctricos, los resultados se expresan en kg CO₂ eq/kWh, mientras que para los sistemas siderúrgicos se expresan en kg CO₂ eq/kg de acero producido.

Tabla 5. Resultados de cambio climático para los escenarios evaluados.

Escenario evaluado		<i>Sphera GaBi</i>	<i>SimaPro</i>
Sistemas Eléctricos (1 kWh) (kg CO ₂ eq/kWh)	Mix energético España 2025	0,0386	0,1762
	Mix eólico España 2025	0,0195	0,0147
Sistemas Siderúrgicos (1 kg acero) (kg CO ₂ eq/kg acero)	Acero (Escenario 1)	0,5455	0,4163
	Acero + mix energético España 2025 (Escenario 2)	0,0212	0,4014
	Acero+ mix eólico España 2025 (Escenario 3)	0,0107	0,3126

Los resultados demuestran diferencias notables entre los escenarios evaluados, tanto para los sistemas eléctricos como para los sistemas siderúrgicos.

Para los sistemas eléctricos (1 kWh), el mix energético español 2025 modelado en *Sphera GaBi* registró emisiones de 0,0386 kg CO₂ eq/kWh. Por su parte el escenario desarrollado en *SimaPro* presento un valor de 0,1762 kg CO₂ eq/kWh. Esta diferencia no debe atribuirse exclusivamente a la herramienta de software empleada, sino principalmente a las características de los inventarios eléctricos utilizados en cada plataforma. Mientras que el modelo desarrollado en *Sphera GaBi* fue construido únicamente con tecnologías renovables representativas del sistema eléctrico español, el proceso desarrollado en *SimaPro* incluye tecnologías renovables como no renovables dentro del mix nacional. Por lo tanto, resulta coherente que el escenario modelado en *Sphera GaBi* presenta una intensidad de carbono menor.

Cuando se analiza el escenario basado exclusivamente en energía eólica, donde la fuente de suministro eléctrico es equivalente entre ambas plataformas, los resultados son muy similares, obteniendo valores de 0,0195 kg CO₂ eq/kWh mediante *Sphera GaBi* y 0,0147 kg CO₂ eq/kWh mediante *SimaPro*. Si bien existe una variación menor del 25% entre ambos valores, esto sugiere que, aunque se tengan consistencias entre los inventarios empleados para el desarrollo de los escenarios, las metodologías de cada herramienta de software asociadas a la regionalización, parametrización y tratamiento interno de los procesos eléctricos pueden influir sobre los resultados obtenidos [36]. Por otro lado, estos valores son coherentes con estudios previos de análisis de ciclo

de vida aplicados a tecnologías eólicas, los cuales reportan emisiones generalmente inferiores a 20 g CO₂ eq/kWh (0,020 kg CO₂ eq/kWh) debido a la ausencia de combustión directa durante la operación y a la baja contribución de la fase operativa en el impacto total [19] [20].

Respecto a los sistemas siderúrgicos (1 kg de acero), el escenario base (Escenario 1) correspondiente al *dataset* original “*steel production, electric, low-alloyed*” de ecoinvent 3.11 sin modificaciones en su suministro eléctrico, presentó los mayores impactos climáticos en ambas herramientas, registrando 0,5455 kg CO₂ eq/kg de acero mediante *Sphera GaBi* y 0,4163 kg CO₂ eq/kg de acero mediante *SimaPro*. Como se había comentado anteriormente estas diferencias reflejan las particularidades de implementación de los inventarios dentro de cada plataforma de ACV, incluyendo aspectos relacionados con la regionalización de procesos, configuración de flujos y tratamiento de datos de fondo [36].

La sustitución del suministro eléctrico original definido en el *dataset* “*steel production, electric, low-alloyed*” de ecoinvent 3.1 por el mix renovable español desarrollado produjo una reducción muy significativa de las emisiones en *Sphera GaBi*, el escenario Acero + mix energético España 2025 (Escenario 2) las emisiones disminuyeron hasta 0,0212 kg CO₂ eq/kg de acero, lo que representa una disminución del 96,1 % respecto al escenario base (Escenario 1).

La reducción fue aún mayor cuando se sustituyó exclusivamente electricidad de origen eólico, el escenario Acero + Mix Eólico España 2025 (Escenario 3), las emisiones descendieron hasta 0,0107 kg CO₂ eq/kg de acero, equivalente a una reducción del 98,0 % respecto al escenario base (Escenario 1) y a una reducción adicional del 49,5 % respecto al escenario renovable español (Escenario 2). Este comportamiento se encuentra directamente relacionado con la baja intensidad de carbono observada previamente para el sistema eléctrico eólico, el cual registró únicamente 0,0195 kg CO₂ eq/kWh. La sustitución de la electricidad convencional en el proceso de acero por electricidad eólica reduce de forma significativa la contribución del suministro energético en el inventario del proceso siderúrgico, trasladando el peso de los impactos hacia etapas asociadas a la fabricación de infraestructuras, equipos y materiales. Estos resultados demuestran la sensibilidad ambiental de la producción de acero frente al origen de la electricidad consumida y evidencian el potencial de la energía eólica como estrategia de descarbonización para procesos industriales electros intensivos.

Los valores obtenidos mediante *SimaPro* fueron de 0,4014 kg CO₂ eq/kg de acero para el escenario Acero + Mix Energético España 2025 (Escenario 2) y de 0,3126 kg CO₂ eq/kg de acero para el escenario Acero + Mix Eólico España 2025 (Escenario 3). Aunque los valores absolutos difieren respecto a los obtenidos en *Sphera GaBi*, por las diferencias anteriormente mencionadas atribuidas a las características de los inventarios utilizados en cada plataforma, ambos resultados evidencian una disminución de las emisiones asociadas a la sustitución del suministro eléctrico convencional en el proceso de producción mediante horno eléctrico de arco, en concordancia con estudios desarrollados por los investigadores La Rosa et al. (2025), García Gutiérrez et al. (2024) y Wu et al. (2025), que identifican al suministro eléctrico como uno de los principales factores de impacto ambiental de la producción de acero [17], [39], [40].

En conjunto, los resultados confirman que la sustitución del suministro eléctrico convencional por sistemas renovables reduce significativamente las emisiones de CO₂ equivalente asociadas a la producción de acero. Entre todos los escenarios evaluados, el sistema basado exclusivamente en energía eólica presentó el mejor desempeño ambiental tanto para la generación de electricidad como para la producción siderúrgica, demostrando el potencial de esta tecnología para contribuir a la descarbonización de procesos industriales electros intensivos.

5.1.2 Evaluación de impacto global (*ReCiPe Endpoint*)

La **Tabla 6** presenta los resultados obtenidos mediante el método *ReCiPe Endpoint (H)*, considerando las categorías de daño relacionadas con salud humana (*Human Health*), ecosistemas (*Ecosystems*) y agotamiento de recursos (*Resources*).

Los impactos asociados a la salud humana se cuantifican formalmente en *DALY* (años de vida ajustados por discapacidad) para medir la carga de enfermedad, mientras que los daños causados en los ecosistemas se expresan en la unidad *species·yr* con el fin de estimar el ritmo de pérdida local de especies. Por último, los efectos sobre el agotamiento de recursos económicos se evalúan directamente en dólares (\$), haciendo referencia al coste excedente que supondrá la futura extracción de materias primas y combustibles fósiles en cada escenario.

Tabla 6. Resultados obtenidos mediante el método *ReCiPe Endpoint (H)*.

Escenario evaluado		Indicador / Categoría de daño	<i>Sphera GaBi</i>	<i>SimaPro</i>
Sistemas Eléctricos (1 kWh)	Mix energético España 2025	<i>Human Health (DALY)</i>	$6,58 \times 10^{-5}$	$3,68 \times 10^{-7}$
		<i>Ecosystems (species-yr)</i>	$1,52 \times 10^{-8}$	$7,4 \times 10^{-10}$
		<i>Resources (\$)</i>	$7,47 \times 10^{-1}$	$2,09 \times 10^{-2}$
	Mix eólico España 2025	<i>Human Health (DALY)</i>	$6,57 \times 10^{-5}$	$1,97 \times 10^{-7}$
		<i>Ecosystems (species-yr)</i>	$4,38 \times 10^{-8}$	$9,0 \times 10^{-11}$
		<i>Resources (\$)</i>	$3,89 \times 10^{-1}$	$1,20 \times 10^{-3}$
Sistemas Siderúrgicos (1 kg acero)	Acero (Escenario 1)	<i>Human Health (DALY)</i>	$3,25 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-4}$
		<i>Ecosystems (species-yr)</i>	$1,13 \times 10^{-5}$	$2,28 \times 10^{-9}$
		<i>Resources (\$)</i>	$8,92 \times 10^0$	$3,34 \times 10^{-2}$
	Acero + mix energético España 2025 (Escenario 2)	<i>Human Health (DALY)</i>	$3,62 \times 10^{-5}$	$1,08 \times 10^{-4}$
		<i>Ecosystems (species-yr)</i>	$8,37 \times 10^{-8}$	$2,20 \times 10^{-9}$
		<i>Resources (\$)</i>	$4,11 \times 10^{-1}$	$3,28 \times 10^{-2}$
	Acero+ mix eólico España 2025 (Escenario 3)	<i>Human Health (DALY)</i>	$3,61 \times 10^{-5}$	$3,17 \times 10^{-7}$
		<i>Ecosystems (species-yr)</i>	$2,41 \times 10^{-8}$	$1,30 \times 10^{-10}$
		<i>Resources (\$)</i>	$2,14 \times 10^{-1}$	$7,00 \times 10^{-4}$

Los resultados obtenidos demuestran diferencias significativas entre los escenarios evaluados, tanto para los sistemas eléctricos (1 kWh) como para los sistemas siderúrgicos (1 kg de acero).

En los sistemas eléctricos (1 kWh), los resultados obtenidos mediante *Sphera GaBi* muestran que el escenario basado exclusivamente en energía eólica presenta el mejor desempeño ambiental en

las categorías de *Human Health* y *Resources*. Para *Human Health*, los valores fueron de $6,58 \times 10^{-5}$ DALY para el mix renovable español y $6,57 \times 10^{-5}$ DALY para el escenario eólico, mientras que en *Resources* los impactos disminuyeron de $7,47 \times 10^{-1}$ \$ para el mix eléctrico español a $3,89 \times 10^{-1}$ \$ para el mix eólico. Estos resultados indican que la generación eólica requiere una menor cantidad de recursos materiales y energéticos a lo largo de su ciclo de vida.

En la categoría *Ecosystems* se observó un comportamiento diferente, registrándose $1,52 \times 10^{-8}$ species·yr para el mix renovable español y $4,38 \times 10^{-8}$ species·yr para el sistema eólico. Este resultado puede atribuirse a las contribuciones asociadas a la fabricación de infraestructuras y materiales considerados en los inventarios de ciclo de vida empleados para la tecnología eólica.

Los resultados obtenidos mediante *SimaPro* muestran igualmente una mejora ambiental asociada al escenario eólico. Los impactos disminuyeron de $3,68 \times 10^{-7}$ en el mix español a $1,97 \times 10^{-7}$ DALY en el mix eólico para la categoría de *Human Health*, de $7,40 \times 10^{-10}$ en el mix español a $9,00 \times 10^{-11}$ species·yr en el mix eólico para la categoría de *Ecosystems* y de $2,09 \times 10^{-2}$ en el mix español a $1,20 \times 10^{-3}$ \$ en el mix eólico para la categoría de *Resources*.

Las diferencias observadas para el mix energético España 2025 entre *Sphera GaBi* y *SimaPro* no deben atribuirse exclusivamente a la herramienta de software utilizada, sino principalmente a las diferencias existentes entre los inventarios empleados en cada plataforma. Mientras que el escenario modelado en *Sphera GaBi* representa un sistema basado exclusivamente en tecnologías renovables, el inventario disponible en *SimaPro* incorpora tanto tecnologías renovables como no renovables dentro del mix eléctrico nacional, lo que influye directamente sobre los resultados obtenidos.

Por otra parte, cuando se compara el escenario basado exclusivamente en energía eólica, donde la fuente de suministro eléctrico es metodológicamente más equivalente entre ambas plataformas, las diferencias observadas pueden asociarse principalmente a aspectos relacionados con la implementación de inventarios, configuración de procesos, regionalización de datos y tratamiento interno de los modelos dentro de cada software de ACV [36].

En los sistemas siderúrgicos (1 kg de acero), el escenario base (Escenario 1), correspondiente al *dataset* original “steel production, electric, low-alloyed” de ecoinvent 3.11 sin modificaciones en el suministro eléctrico, presentó los mayores impactos ambientales en todas las categorías

evaluadas. En *Sphera GaBi* se obtuvieron valores de $3,25 \times 10^{-2}$ DALY para *Human Health*, $1,13 \times 10^{-5}$ species·yr para *Ecosystems* y 8,92 \$ para *Resources*. Estos resultados reflejan la elevada influencia que ejerce el suministro eléctrico sobre el desempeño ambiental del proceso siderúrgico, en concordancia con lo reportado por diversos autores para procesos basados en horno eléctrico de arco [17], [39], [40].

La sustitución del suministro eléctrico origina del proceso de producción de acero por el mix renovable español (Escenario 2) produjo reducciones significativas en todas las categorías evaluadas. En *Sphera GaBi*, los impactos disminuyeron hasta $3,62 \times 10^{-5}$ DALY en *Human Health*, $8,37 \times 10^{-8}$ species·yr en *Ecosystems* y $4,11 \times 10^{-1}$ \$ en *Resources*. La reducción fue aún mayor cuando se empleó exclusivamente electricidad de origen eólico (Escenario 3), alcanzando valores de $3,61 \times 10^{-5}$ DALY, $2,41 \times 10^{-8}$ species·yr y $2,14 \times 10^{-1}$ \$, respectivamente. Estos resultados demuestran que la sustitución del suministro eléctrico constituye el principal factor responsable de la reducción de impactos ambientales observada en el sistema siderúrgico.

Los resultados obtenidos mediante *SimaPro* muestran igualmente una mejora ambiental al sustituir el suministro eléctrico original por alternativas renovables. El escenario Acero + Mix Eólico España 2025 (Escenario 3) presentó los menores impactos ambientales dentro de la plataforma, registrando $3,17 \times 10^{-7}$ DALY en *Human Health*, $1,30 \times 10^{-10}$ species·yr en *Ecosystems* y $7,00 \times 10^{-4}$ \$ en *Resources*. Al igual que en el análisis de cambio climático, las diferencias observadas respecto a *Sphera GaBi* deben interpretarse considerando las particularidades de implementación de inventarios, configuración de flujos y tratamiento de procesos de eléctricos, tal como señalan Herrmann et al. (2015) [36]. Por ello, la comparación realizada debe interpretarse principalmente desde una perspectiva metodológica orientada al análisis de tendencias ambientales, más que como una equivalencia exacta de resultados absolutos entre plataformas.

En conjunto, los resultados obtenidos mediante *ReCiPe Endpoint* confirman que el escenario basado exclusivamente en energía eólica presenta el mejor desempeño ambiental global entre todos los escenarios evaluados. Este comportamiento coincide con estudios previos de análisis de ciclo de vida que identifican a la energía eólica como una de las tecnologías de generación eléctrica con menores impactos ambientales acumulados a lo largo de su ciclo de vida [3], [19], [21] .

5.1.3 Demanda de energía primaria

La **Tabla 7** presenta los resultados de la demanda acumulada de energía primaria (*Primary Energy Demand*), expresados en MJ.

Tabla 7. Resultados de demanda de energía primaria para los escenarios evaluados.

Escenario evaluado		<i>Sphera GaBi</i> (MJ)	<i>SimaPro</i> (MJ)
Sistemas Eléctricos (1 kWh)	Mix energético España 2025	4,55	7,25
	Mix eólico España 2025	4,14	4,06
Sistemas Siderúrgicos (1 kg acero)	Acero (Escenario 1)	9,75	8,34
	Acero + mix energético España 2025 (Escenario 2)	2,50	7,64
	Acero+ mix eólico España 2025 (Escenario 3)	2,28	5,89

Los resultados obtenidos muestran diferencias entre los escenarios evaluados, tanto para los sistemas eléctricos (1 kWh) como para los sistemas siderúrgicos (1 kg de acero).

Para los sistemas eléctricos (1 kWh), el mix energético España 2025 modelado en *Sphera GaBi* presentó una demanda de energía primaria de 4,55 MJ, mientras que el escenario basado exclusivamente en energía eólica registró un valor de 4,14 MJ, equivalente a una reducción del 9,0 %. Estos resultados indican que la energía eólica requiere menores consumos energéticos acumulados a lo largo de su ciclo de vida en comparación con un sistema renovable compuesto por múltiples tecnologías.

Cuando se comparan los resultados obtenidos para el sistema eólico entre ambas plataformas, se observan valores muy similares, con 4,14 MJ en *Sphera GaBi* y 4,06 MJ en *SimaPro*. Esta proximidad confirma nuevamente la coherencia de los inventarios empleados para la tecnología eólica en ambas herramientas, aunque al existir una variación, esto sugiera que, aunque se tengan consistencias entre los inventarios empleados para el desarrollo de los escenarios, las metodologías de cada herramienta de software asociadas a la regionalización, parametrización y tratamiento

interno de los procesos eléctricos pueden influir con los resultados. Aun así, los resultados son consistentes con estudios previos de análisis de ciclo de vida que identifican a la energía eólica como una de las tecnologías de generación eléctrica con menor demanda energética acumulada durante su ciclo de vida [3], [4], [19].

En los sistemas siderúrgicos (1 kg de acero), el escenario base (Escenario 1), correspondiente al *dataset* original “*steel production, electric, low-alloyed*” de *ecoinvent* 3.11 sin modificaciones en el suministro eléctrico, presentó los mayores requerimientos de energía primaria en ambas plataformas, alcanzando 9,75 MJ en *Sphera GaBi* y 8,34 MJ en *SimaPro*. Estos resultados reflejan la elevada intensidad energética asociada al proceso de producción de acero mediante horno eléctrico de arco, tal como ha sido reportado en estudios previos [17], [39], [40].

La sustitución del suministro eléctrico original del proceso de producción de acero por el mix renovable español produjo una reducción significativa de la demanda de energía primaria en *Sphera GaBi*. En el escenario Acero + Mix Energético España 2025 (Escenario 2), la demanda disminuyó hasta 2,50 MJ por kilogramo de acero producido, lo que representa una reducción del 74,4 % respecto al escenario base (Escenario 1).

Este comportamiento continuo cuando se empleó exclusivamente electricidad de origen eólico. En el escenario Acero + Mix Eólico España 2025 (Escenario 3), la demanda de energía primaria descendió hasta 2,28 MJ/kg de acero, equivalente a una reducción del 76,6 % respecto al escenario base y del 8,8 % respecto al escenario renovable español. Estos resultados demuestran que el uso de electricidad de origen eólico permite minimizar los requerimientos energéticos acumulados asociados a la producción de acero.

Los valores obtenidos mediante *SimaPro* muestran la misma tendencia general de reducción al sustituir el suministro eléctrico original por alternativas renovables. Se registraron valores de 7,64 MJ para el escenario Acero + Mix Energético España 2025 (Escenario 2) y de 5,89 MJ para el escenario Acero + Mix Eólico España 2025 (Escenario 3). Al igual que en los indicadores anteriores, las diferencias observadas en el escenario 3 respecto a *Sphera GaBi* se encuentran asociadas a particularidades en la implementación de inventarios, regionalización de procesos, configuración de flujos y tratamiento de datos de fondo dentro de cada plataforma de ACV [36]. En conjunto, los resultados confirman que el suministro eléctrico constituye uno de los factores más determinantes en el desempeño energético del sistema siderúrgico analizado. Entre todos los escenarios evaluados, el sistema basado exclusivamente en energía eólica presentó los menores

requerimientos de energía primaria tanto para la generación eléctrica como para la producción de acero, evidenciando el potencial de la electrificación renovable como estrategia para reducir el consumo energético asociado a procesos industriales intensivos en energía.

5.2 Impacto de las tecnologías renovable

El análisis de impacto de las tecnologías renovables permitió identificar las principales fuentes de impacto ambiental dentro del mix eléctrico renovable español modelado para el año 2025.

La **Tabla 8** muestra la contribución relativa de las principales tecnologías renovables consideradas dentro del sistema eléctrico español respecto a su modelación en la herramienta de software *Sphera GaBi* utilizando el *dataset* de *ecoinvent* 3.11, así como su participación porcentual dentro del mix modelado.

Tabla 8. Impacto de tecnologías renovables al potencial de calentamiento global (GWP100) del mix eléctrico español 2025.

Tecnología	GWP100 (kg CO ₂ eq/kWh)	Participación en el mix eléctrico (%)
Eólica	$5,8 \times 10^{-3}$	38,9
Solar fotovoltaica	$22,0 \times 10^{-3}$	33,2
Hidráulica	$7,5 \times 10^{-3}$	22,3
Solar térmica	$1,3 \times 10^{-3}$	2,4
Biomasa / biogás	$2,0 \times 10^{-3}$	3,0

Los resultados cuantitativos muestran que la energía solar fotovoltaica presenta la mayor contribución relativa al impacto ambiental por kWh dentro del sistema renovable, con un valor de $22,0 \times 10^{-3}$ kg CO₂ eq/kWh. Al relacionar este impacto con la participación en el mix eléctrico español, se evidencia una discrepancia, donde a pesar que la tecnología solar fotovoltaica aporta menor energía al mix (33,2%) en comparación con la eólica (38,9%), su intensidad de carbono es superior, lo cual implica que la energía solar fotovoltaica ejerce una presión desproporcionada sobre la huella global del mix renovable, un comportamiento asociado principalmente a la alta intensidad energética del proceso *upstream* y al elevado consumo de materiales críticos durante la manufactura de las celdas de silicio, marcos de aluminio, conductores de cobre y vidrio de protección [21], [25], [26].

En contraste, la energía eólica consolidó un impacto integrado de $5,8 \times 10^{-3}$ kg CO₂ eq/kWh, demostrando la mayor eficiencia ambiental del inventario al presentar la mayor tasa de participación en el mix eléctrico español con el menor factor de emisión unitario entre las tecnologías con mayor participación. Por debajo de la solar fotovoltaica también se situó la energía hidráulica, que alcanzó los valores de $7,5 \times 10^{-3}$ kg CO₂ eq/kWh que se asocian principalmente a la infraestructura de obra civil (hormigón y acero) tanto en centrales de embalse como fluyentes.

Por último, la energía solar térmica se situó en $1,3 \times 10^{-3}$ kg CO₂ eq/kWh, mientras que biomasa y biogás reportaron valores de $2,0 \times 10^{-3}$ kg CO₂ eq/kWh. El bajo perfil de emisiones de la biomasa se debe a la exclusión metodológica del carbono biogénico en el modelo, reflejando únicamente los impactos de la cadena logística, transporte y pretratamiento del recurso térmico.

En conjunto, estos hallazgos evidencian que el desempeño ambiental del mix eléctrico no depende de las emisiones operativas directas (nulas en la fase de generación síncrona), sino de las cargas indirectas asociadas a la extracción de materias primas, fabricación de componentes y cadenas de suministro globales consideradas bajo el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

5.3 Evolución histórica de emisiones de CO₂ y participación renovable en España

Con el propósito de analizar la evolución del sistema eléctrico español, se compararon las emisiones de CO₂ equivalente y la composición del mix eléctrico correspondientes a los años 2014, 2015, 2024 y al escenario proyectado para 2025.

Los resultados se representan mediante gráficas de evolución temporal que permiten evaluar la reducción progresiva de emisiones y el incremento de la participación de tecnologías renovables en el sistema eléctrico español [6], [7], [8].

La **Figura 2** representa la evolución temporal de las emisiones de CO₂ equivalente asociadas al sistema eléctrico español, así como la cuota de participación de tecnologías renovables durante los periodos analizados. Esta perspectiva histórica permite contextualizar la velocidad de la transición energética del país, permitiendo contrastar las tendencias reales observadas en la última década frente a las metas de descarbonización planteadas a corto y medio plazo.

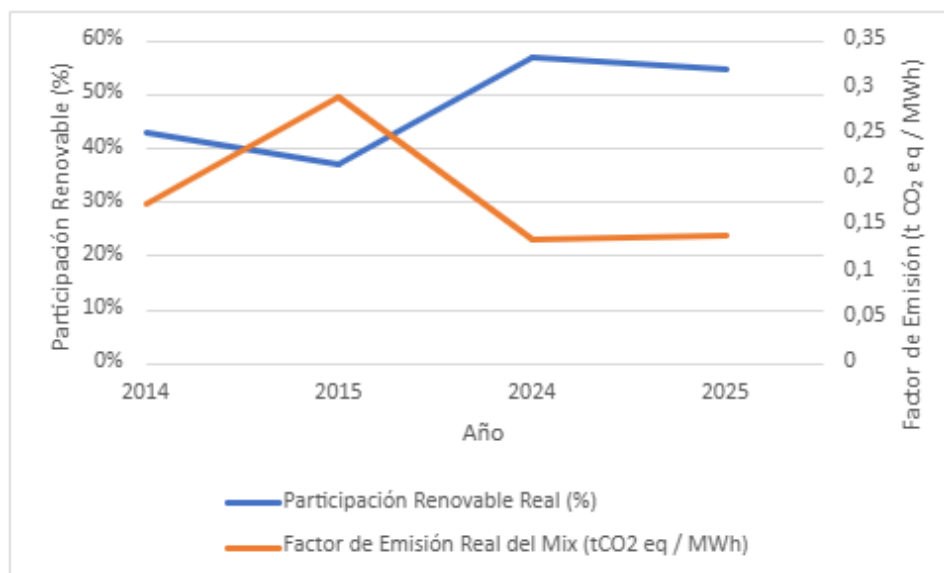


Figura 2. Evolución de la intensidad de carbono del sistema eléctrico español y de la participación de energías renovables durante los periodos 2014-2015 y 2024-2025. Elaboración propia a partir de datos de Red Eléctrica de España (REE) [6].

A partir de los datos proporcionados por Red Eléctrica de España (REE) [6], se evaluó el comportamiento temporal de las emisiones de CO₂ equivalente asociadas a la red nacional para los años 2024-2025, incorporando un contraste histórico con el periodo 2014-2015.

Los resultados muestran una disminución progresiva de las emisiones vinculada al incremento de la participación de tecnologías renovables dentro del mix de generación nacional, impulsado fundamentalmente por el crecimiento exponencial de la potencia instalada eólica y solar fotovoltaica [6].

De manera inversa, se observa un retroceso de las tecnologías térmicas convencionales basadas en combustibles fósiles, como las centrales de carbón y los ciclos combinados de gas natural, las cuales históricamente constituían el núcleo de la intensidad de carbono del sistema.

Dado que la mayoría de las tecnologías renovables presentan emisiones operativas directas muy reducidas o prácticamente nulas durante la generación eléctrica, su mayor integración en el sistema contribuye a disminuir la intensidad de carbono del mix eléctrico nacional. Estos hallazgos demuestran que maximizar el peso de las fuentes limpias dentro de la de generación reduce de forma efectiva el respaldo fósil, confirmando el potencial de descarbonización industrial mediante la electrificación de procesos analizada en este estudio.

5.4 Análisis variabilidad estacional de la generación eléctrica renovable en España durante 2025.

La **Figura 3** presenta el análisis estacional de la generación eléctrica renovable por tecnologías en España durante el año base 2025. Esta visualización agrupa los datos en los cuatro trimestres climáticos principales Invierno (diciembre-enero-febrero); Primavera (marzo-abril-mayo); Verano (junio-julio-agosto), y Otoño (septiembre-octubre-noviembre), permitiendo auditar la variabilidad del sistema eléctrico de fondo.

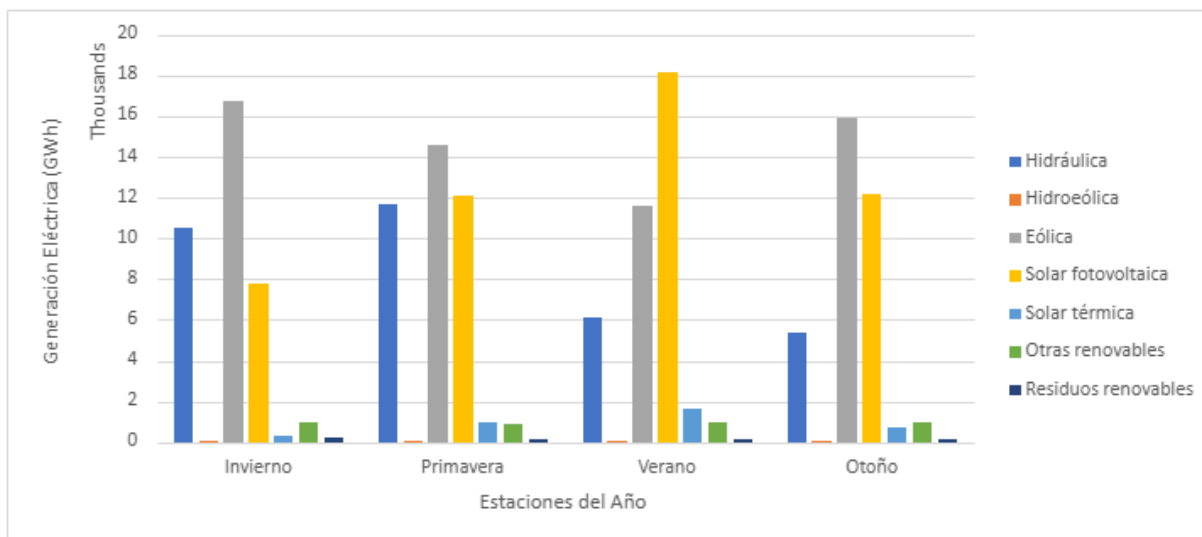


Figura 3. Balance estacional de la generación eléctrica renovable por tecnologías en el sistema español durante el periodo anual 2025. Elaboración propia a partir de datos de Red Eléctrica de España (REE) [6].

El análisis de los datos de generación eléctrica correspondientes al año 2025, proporcionados por Red Eléctrica de España (REE) [6], muestra una elevada variabilidad temporal en la contribución de las diferentes tecnologías renovables al sistema eléctrico español.

La energía eólica mostro una marcada variabilidad estacional, alcanzando su máxima generación durante el invierno (16.760,92 GWh). Valores igualmente elevados se observaron en otoño (15.894,46 GWh) y primavera (14.582,24 GWh), mientras que el verano registró la menor producción (11.563,18 GWh). Este comportamiento se asocia a la disponibilidad del recurso eólico y a los patrones meteorológicos predominantes en la península ibérica [6].

Por otro lado, la energía solar fotovoltaica fue la tecnología que experimentó el mayor incremento estacional durante el verano, alcanzando una generación de 18.122,03 GWh. La energía solar térmica también aumento su producción en este periodo, aunque su aportación fue

significativamente menor, con (1.635,19 GWh), por lo que su representación en la **Figura 3** resulta menos visible.

La energía hidráulica presentó una marcada variabilidad estacional respecto a otras tecnologías renovables, alcanzando su máxima generación durante la primavera con (11.672,59 GWh) y un mínimo en otoño (5.389,44 GWh). Este comportamiento refleja su dependencia de las condiciones hidrológicas y a la disponibilidad de recursos hídricos a lo largo del año. Por otro lado, la tecnología hidroeléctrica registro los niveles más bajos de generación de todo el mix renovable, con valores entre 3,78 GWh en invierno y 8,74 GWh en verano, lo que evidencia su escasa contribución relativa dentro del sistema eléctrico español durante el período evaluado.

Las tecnologías restantes del mix renovable, agrupadas como otras renovables (biomasa, biogás y otras fuentes renovables) y residuos renovables, mantuvieron una contribución estable y predecible durante todo el año, operando como tecnologías menos dependientes de la variabilidad estacional con promedios en torno a los 950 GWh y 170 GWh, respectivamente.

Este comportamiento, demuestra la fuerte dependencia del sistema eléctrico renovable respecto a las condiciones meteorológicas, lo que introduce una variabilidad estacional significativa en la generación eléctrica nacional. Asimismo, el análisis demuestra la importancia crítica de la complementariedad tecnológica dentro del mix renovable español, donde el acoplamiento de diferentes tecnologías permite compensar parcialmente la variabilidad asociada a recursos naturales específicos, aportando a la estabilidad y resiliencia del suministro que alimentará los escenarios industriales evaluados en este estudio.

5.5 Discusión general

Los resultados obtenidos confirman que la transición hacia sistemas eléctricos basados en fuentes renovables constituye una estrategia eficaz para reducir los impactos ambientales asociados a procesos industriales con elevada dependencia energética, como la producción de acero mediante horno eléctrico de arco (*EAF*). La sustitución del suministro eléctrico original por escenarios renovables permitió disminuir de forma consistente las emisiones de gases de efecto invernadero, la demanda acumulada de energía primaria y los impactos ambientales evaluados mediante el método *ReCiPe Endpoint (H)*. Asimismo, los resultados demostraron que el origen de la electricidad utilizada es uno de los factores más determinantes en el desempeño ambiental global del sistema siderúrgico analizado, ya que, ligeras modificaciones en el suministro eléctrico

generaron reducciones ambientales considerables en comparación con el escenario base (Escenario 1). [17], [39], [40].

Entre los escenarios analizados, el sistema basado exclusivamente en energía eólica presentó el mejor desempeño ambiental global tanto para los sistemas eléctricos como para los sistemas siderúrgicos. Este comportamiento se observó en los indicadores de cambio climático, demanda de energía primaria y agotamiento de recursos, destacando el potencial de la energía eólica como alternativa de suministro eléctrico de baja intensidad de carbono para procesos industriales, esto resultados son coherentes con estudios previos de análisis de ciclo de vida, que identifican a la energía eólica como una de las tecnologías de generación eléctrica con menor intensidad de carbono y menores impactos ambientales a lo largo de su ciclo de vida [2], [3], [19].

Asimismo, los resultados obtenidos para el mix eléctrico renovable español proyectado para 2025 evidencian el efecto positivo asociado al incremento progresivo de la participación de energías renovables dentro del sistema eléctrico nacional. Aunque este escenario no alcanza los niveles de desempeño ambiental del sistema eólico, permitió obtener reducciones considerables respecto al escenario base de producción de acero, demostrando el potencial de la transición energética español para contribuir a la descarbonización industrial. Este comportamiento resulta coherente con la evolución reciente del sistema eléctrico español y con los objetivos establecidos en materia de transición energética y reducción de emisiones [6].

El análisis de contribución tecnológica permitió identificar que los impactos ambientales de las tecnologías renovables no dependen exclusivamente de sus emisiones durante la fase de operación, sino también de las etapas asociadas a la fabricación de infraestructuras, el consumo de materiales como acero, aluminio, cobre y silicio, así como los procesos asociados a la construcción y mantenimiento de las instalaciones. Aunque estas contribuciones son inferiores a las asociadas a tecnologías no renovables, continúan representando una parte relevante del impacto total evaluado mediante la metodología de análisis de ciclo de vida [12], [13].

Por otra parte, el análisis histórico realizado para el sistema eléctrico español mostro una reducción progresiva de las emisiones asociadas a la generación eléctrica entre los diferentes periodos evaluados, reflejando el avance de las políticas de descarbonización y el aumento de la participación de fuentes renovables dentro del mix nacional [6], [7]. De forma complementaria, el análisis estacional evidenció la importancia de la complementariedad entre tecnologías renovables

para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico frente a la variabilidad temporal de los recursos naturales disponibles.

Finalmente, la comparación metodológica entre *Sphera GaBi* y *SimaPro* mostró tendencias ambientales consistentes en los escenarios equivalentes evaluados específicamente Escenario 1 y Escenario 3, aunque con diferencias cuantitativas derivadas de aspectos relacionados con la implementación de inventarios, el tratamiento de procesos eléctricos y la configuración interna de cada plataforma. Estos resultados coinciden con estudios comparativos previos que destacan la influencia de las decisiones metodológicas sobre los resultados finales de los estudios de ACV [36]. Por ello, las diferencias observadas deben interpretarse desde una perspectiva metodológica, centrada en el análisis de tendencias generales más que en la comparación numérica de resultados absolutos.

6. Conclusiones

El presente estudio permitió evaluar el desempeño ambiental del sistema eléctrico renovable español mediante la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), utilizando *datasets* de *ecoinvent* 3.11 y las herramientas de software *Sphera GaBi* y *SimaPro*. La integración de diferentes tecnologías renovables representativas del contexto español permitió analizar tanto el comportamiento ambiental de sistemas eléctricos renovables como su influencia sobre procesos industriales con elevada dependencia energética.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la incorporación de energías renovables en el sistema eléctrico reduce significativamente las emisiones de CO₂ equivalente, la demanda acumulada de energía primaria e impactos ambientales asociados a salud humana, ecosistemas y agotamiento de recursos. En todos los indicadores evaluados se observó una mejora ambiental respecto a escenarios con mayor participación de fuentes energéticas convencionales.

La aplicación del análisis al proceso de producción de acero mediante horno eléctrico de arco demostró que el suministro eléctrico constituye uno de los factores más determinantes del desempeño ambiental global del sistema. La sustitución del suministro eléctrico original por escenarios renovables permitió reducir los impactos ambientales asociados al proceso de producción de acero en todas las categorías evaluadas.

Entre los escenarios analizados, el sistema basado exclusivamente en energía eólica presentó los menores impactos ambientales. En particular, para el indicador de cambio climático se observaron reducciones de hasta el 98 % respecto al escenario base (Escenario 1) modelado en *Sphera GaBi*. Estos resultados demuestran el potencial de la energía eólica como alternativa para la descarbonización de procesos industriales electros intensivos y como una de las tecnologías de generación eléctrica con mejor desempeño ambiental dentro del conjunto de energías renovables evaluadas.

El estudio también demostró que, aunque las tecnologías renovables presentan bajas emisiones durante la fase de operación, continúan existiendo impactos asociados a la fabricación de infraestructuras, consumo de materiales y procesos industriales considerados dentro de su ciclo de vida. En consecuencia, la evaluación integral mediante ACV resulta fundamental para comprender el comportamiento ambiental real de estas tecnologías y evitar interpretaciones basadas únicamente en las emisiones operativas.

La comparación entre *Sphera GaBi* y *SimaPro* mostró tendencias ambientales coherentes entre escenarios, aunque con diferencias cuantitativas derivadas de aspectos metodológicos propios de cada herramienta como de las características específicas de los inventarios disponibles en cada plataforma. Por ello, los resultados comparativos deben interpretarse principalmente como una evaluación de tendencias ambientales generales bajo condiciones de modelado equivalentes y no como una comparación estricta de valores absolutos.

En conjunto, los resultados confirman el papel fundamental de la transición hacia sistemas eléctricos renovables como estrategia para la descarbonización industrial y la reducción de impactos ambientales, contribuyendo al avance de los objetivos de sostenibilidad y transición energética planteados para el contexto español.

7. Bibliografía.

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

- [1] G. Parrado-Hernando, P. Antun, F. Fernando, M. G. Luis Javier, and D. Neven, "A novel approach to represent the energy system in integrated assessment models," *Energy*, vol. 258, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124743.
- [2] Ottmar. Edenhofer, *Climate change 2014 : mitigation of climate change : Working Group III contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2015.
- [3] R. Turconi, A. Boldrin, and T. Astrup, "Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations," 2013, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.013.
- [4] F. Asdrubali, G. Baldinelli, F. D'Alessandro, and F. Scrucca, "Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization," 2015, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2014.10.082.
- [5] M. G. Hemeida, A. M. Hemeida, T. Senjyu, and D. Osheba, "Renewable Energy Resources Technologies and Life Cycle Assessment: Review," Dec. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15249417.
- [6] Red Eléctrica de España., "Informe del Sistema Eléctrico Español 2025.," Apr. 2026. Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/es/informe-del-sistema-electrico/generacion/generacion-de-energia-electrica/generacion-total-de-energia-electrica>
- [7] P. M. R. Bento, S. J. P. S. Mariano, J. A. N. Pombo, and M. R. A. Calado, "Large-scale penetration of renewables in the Iberian power system: Evolution, challenges and flexibility options," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 204, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114794.
- [8] L. Berridy-Segade, M. del Prado Díaz de Mera Sánchez, M. Á. Reyes-Belmonte, and M. Martín-Gamboa, "Assessing the social life cycle impacts of the Spanish electricity mix: A decadal analysis," *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 49, pp. 329–340, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.spc.2024.06.030.
- [9] International Organization for Standardization., "ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework," Geneva, Switzerland, 2006.

- [10] International Organization for Standardization, "ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines," Geneva, Switzerland, 2006.
- [11] B. Kumar and P. Verma, "Life cycle assessment: Blazing a trail for bioresources management," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 10, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.ecmx.2020.100063.
- [12] D. García-Gusano, D. Iribarren, I. Muñoz, E. Arrizabalaga, L. Mabe, and M. Martín-Gamboa, "The future need for critical raw materials associated with long-term energy and climate strategies: The illustrative case study of power generation in Spain," *Energy*, vol. 314, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2024.134266.
- [13] A. Santos, A. Rodriguez, and A. Carvalho, "Decarbonization of the electrical sector: A new model for the environmental assessment of global copper cathode and aluminum ingot supply chains," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 205, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.compchemeng.2025.109475.
- [14] Naciones Unidas, "Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna," 2015. Accessed: May 30, 2026. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [15] Naciones Unidas, "Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación," 2015. Accessed: May 30, 2026. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- [16] Naciones Unidas, "Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos," 2015. Accessed: May 30, 2026. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- [17] X. Wu *et al.*, "Technological pathways for cost-effective steel decarbonization," *Nature*, vol. 647, no. 8088, pp. 93–101, Nov. 2025, doi: 10.1038/s41586-025-09658-9.
- [18] M. Hussain, Z. Ye, B. Zheng, C. M. Lam, S. C. Hsu, and T. M. Chan, "Sustainable design of high-strength steel structural components: Process-based life cycle assessment with uncertainty and sensitivity analysis," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 236, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.jcsr.2025.110002.
- [19] D. Nugent and B. K. Sovacool, "Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey," *Energy Policy*, vol. 65, pp. 229–244, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.10.048.

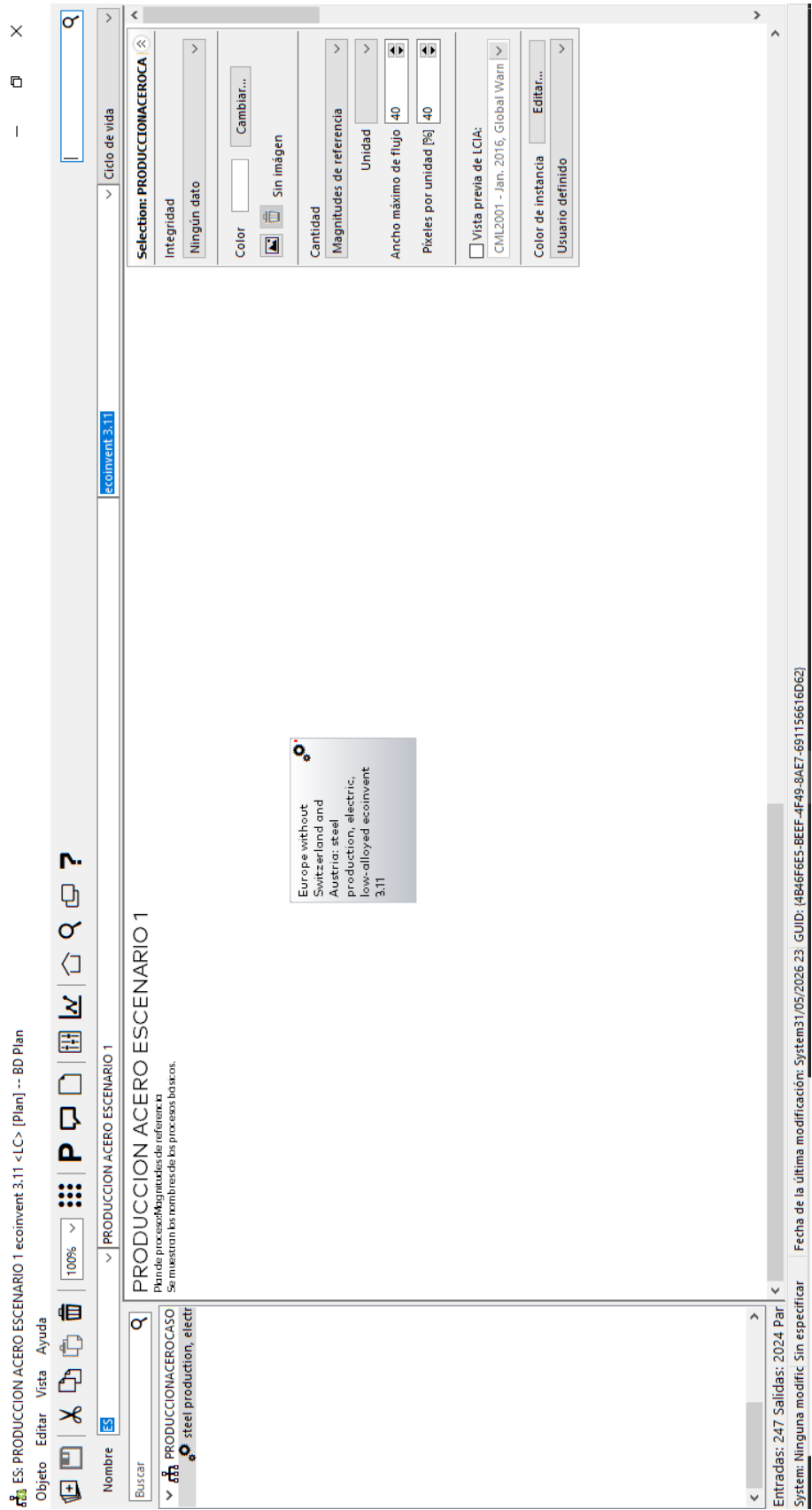
- [20] M. Faizan and I. Afgan, "Life cycle assessment of wind turbine systems: A statistical synthesis approach to address greenhouse gas emissions," Jan. 01, 2026, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2025.116429.
- [21] V. M. Fthenakis and H. C. Kim, "Photovoltaics: Life-cycle analyses," *Solar Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 1609–1628, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.solener.2009.10.002.
- [22] S. Guillén-Lambea, R. Abrahão, and M. Carvalho, "Life cycle assessment of power generation systems in Spain: Exploring a broader view from a consequential perspective," *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 38, pp. 28–40, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.spc.2023.03.018.
- [23] L. Bozzoli, M. Cipolletta, A. Dal Pozzo, C. A. Nucci, and V. Cozzani, "Assessing the environmental sustainability of alternative design concepts for transmission systems of offshore renewable energy," *Appl. Energy*, vol. 399, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.126486.
- [24] S. Fayyaz, M. S. Schjønerberg, B. Khoshnevisan, J. Eltzholtz, M. T. Ashraf, and M. Birkved, "Trade-offs between circularity and sustainability: A prospective sustainability assessment of wind turbine blade recycling considering socioeconomic pathways and climate policies," *Energy Convers. Manag.*, vol. 348, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.enconman.2025.120697.
- [25] I. Ihoume, M. van Noord, and A. Augusto, "Toward a transparent life cycle assessment of photovoltaic systems: Addressing regulatory and methodological challenges," Apr. 01, 2026, *Elsevier Inc.* doi: 10.1016/j.eiar.2025.108290.
- [26] K. H. Y. Ho, A. W. L. Ee, M. Son, S. Rahmani, F. M. Liyaff, and R. Fouquet, "Environmental impact assessment of solar panel production and recycling in Southeast Asia," *J. Clean. Prod.*, vol. 522, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.146277.
- [27] L. Ma *et al.*, "Energy efficiency analysis and life cycle assessment of a recovery process from end-of-life photovoltaic panels," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 294, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.solmat.2025.113931.
- [28] S. Longo, R. Rincione, M. Cellura, F. Rossi, A. Sinicropi, and M. L. Parisi, "Life cycle assessment of concentrating solar power systems and concentrating photovoltaic systems: A review," Dec. 01, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.egy.2025.11.067.
- [29] C. A. Vielma, M. Majó, A. Calderón, A. Svobodova-Sedlackova, A. I. Fernández, and C. Barreneche, "Life cycle assessment of a conventional thermal energy storage system versus an alternative steel slag-based system for concentrating solar power plants," *J. Energy Storage*, vol. 145, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.est.2025.119843.

- [30] E. Gemechu and A. Kumar, "A review of how life cycle assessment has been used to assess the environmental impacts of hydropower energy," Oct. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2022.112684.
- [31] M. T. B. Geller and A. A. D. M. Meneses, "Life cycle assessment of a small hydropower plant in the Brazilian amazon," *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 379–391, Dec. 2016, doi: 10.13044/j.sdewes.2016.04.0029.
- [32] V. C. de Albuquerque, R. F. Calili, M. F. L. de Almeida, R. Albuquerque, T. Castro, and R. Kelman, "Integrated Spatiotemporal Life Cycle Assessment Framework for Hydroelectric Power Generation in Brazil," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 21, Nov. 2025, doi: 10.3390/en18215606.
- [33] A. Kadiyala, R. Kommalapati, and Z. Huque, "Evaluation of the life cycle greenhouse gas emissions from different biomass feedstock electricity generation systems," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 8, no. 11, Nov. 2016, doi: 10.3390/su8111181.
- [34] Sphera, "GaBi Software: Product Sustainability and Life Cycle Assessment Tool," Chicago, IL, 2024. Accessed: Apr. 29, 2026. [Online]. Available: <https://gabi.sphera.com>
- [35] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, Sep. 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- [36] I. T. Herrmann and A. Moltesen, "Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? - A comparative assessment of SimaPro and GaBi," *J. Clean. Prod.*, vol. 86, pp. 163–169, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.08.004.
- [37] M. A. J. Huijbregts *et al.*, "ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, no. 2, pp. 138–147, Feb. 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [38] I. Bonilla-Campos, F. J. Sorbet, and D. Astrain, "Radical change in the Spanish grid: Renewable energy generation profile and electric energy excess," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 32, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.segan.2022.100941.
- [39] A. D. La Rosa, I. Åsen, G. Ingarao, and L. Fratini, "Life Cycle Assessment of a steel component produced from electric arc furnace," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 59, pp. 127–134, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.cirpj.2025.03.007.

- [40] I. García Gutiérrez, C. Pina, R. Tobajas, and D. Elduque, "Incorporating composition into life cycle assessment of steel grades," *J. Clean. Prod.*, vol. 472, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143538.

8. Anexos

Anexo I. Simulación desarrollada en *Sphera GaBi* para el Escenario 1, correspondiente al proceso de producción de acero de baja aleación mediante horno eléctrico de arco (“*steel production, electric, low-alloyed Europe without Switzerland and Austria*”) de la base de datos ecoinvent 3.11.



Anexo II. Inventario de ciclo de vida (ICV) del Escenario 1 en *Sphera GaBi*, mostrando los principales flujos de entrada de recursos y salida de emisiones asociados a la producción de 1 kg de acero de baja aleación.

Europe without Switzerland and Austria: steel production, electric, low-alloyedecoinvent 3.11 [2410]Manufacture of basic iron and steel] -- BD Proceso

Objeto Editar Vista Ayuda

Nombre steel production, electric, low-alloyed

Buscar

Agg - Resultado de ICV

Parámetro Fórmula Valor Mínimo Máximo Desviac Comen

Integridad ECV FV LCSS 1,72 EUR ETCV Documentación

Entradas

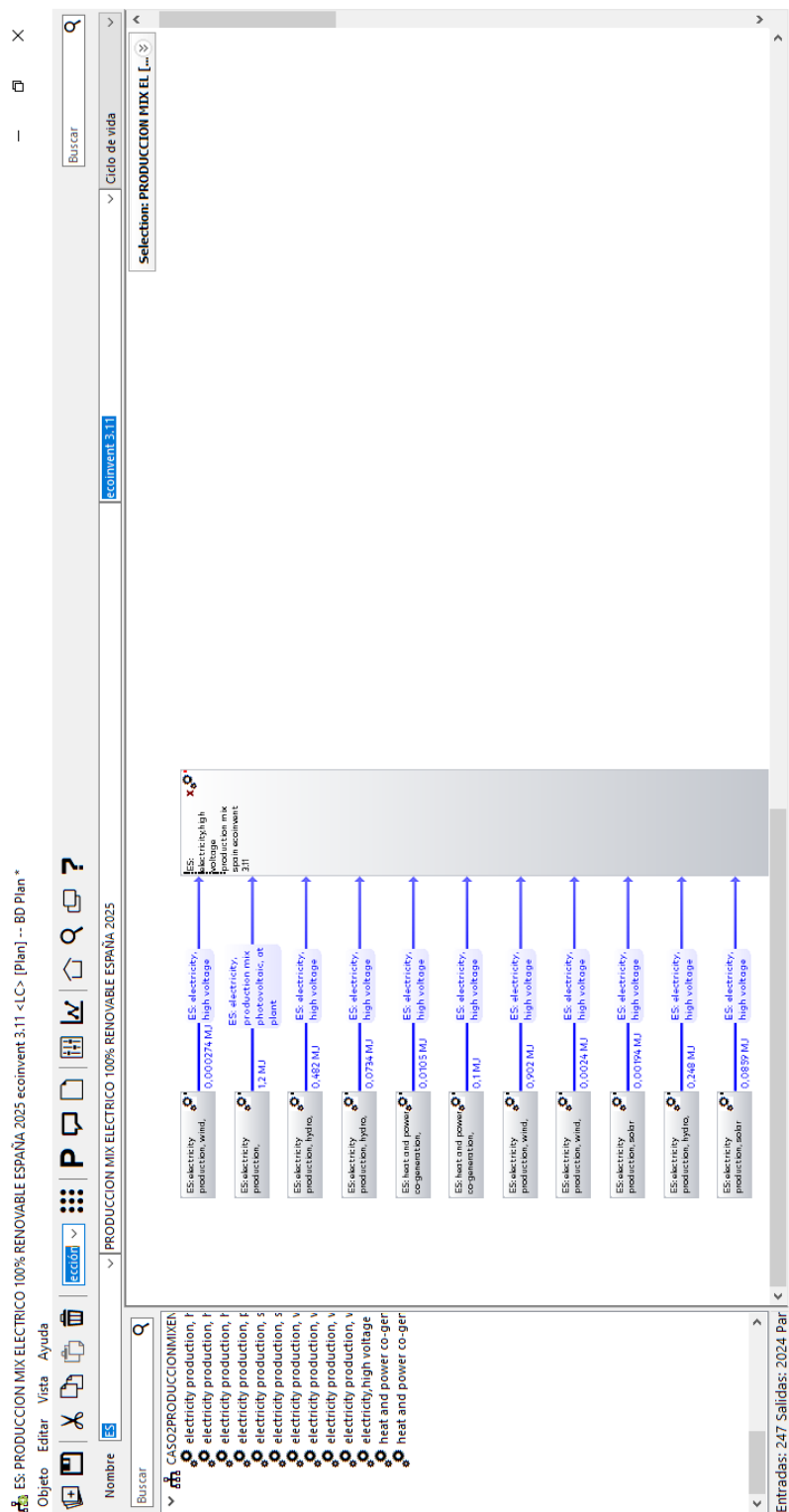
Flujo	Cantidad	Unidad	Mt	Desviac	Origen	Comentario
Agriculture [Occupation]	6,53E-006	m2*yr	0 %	(Ningún dato)		
Aluminium [Non renewable element]	0,000411	kg	0 %	(Ningún dato)		
Anhydrite (Rock) [Non renewable resource]	6,62E-010	kg	0 %	(Ningún dato)		
Antimony [Non renewable element]	2,66E-010	kg	0 %	(Ningún dato)		
Arable [Occupation]	2,86E-008	m2*yr	0 %	(Ningún dato)		
Arable, fallow [Occupation]	1,93E-010	m2*yr	0 %	(Ningún dato)		
Arable, irrigated [Occupation]	1,65E-006	m2*yr	0 %	(Ningún dato)		
Arable, irrigated, intensive [Occupation]	8,32E-009	m2*yr	0 %	(Ningún dato)		

Salidas

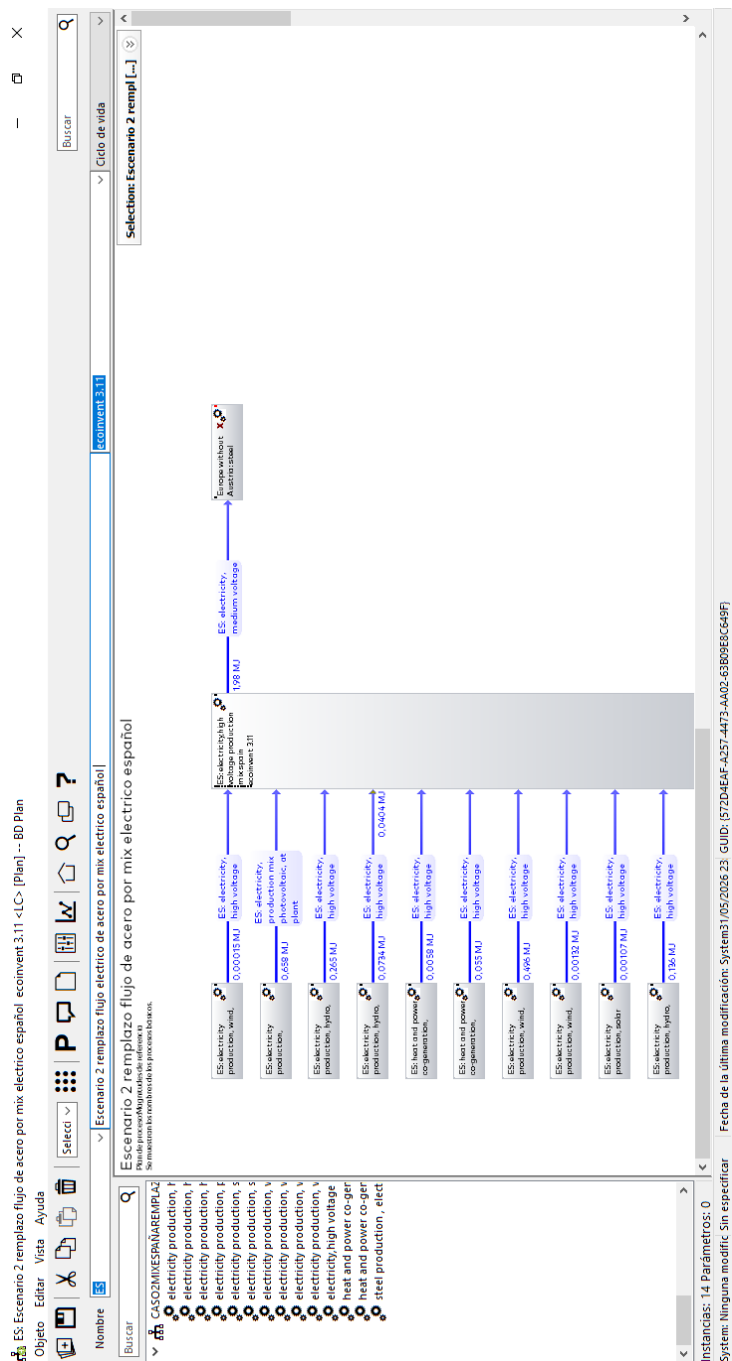
Flujo	Cantidad	Unidad	Mt	Desviac	Origen	Comentario
steel, low-alloyed [7218: Stainless steel]	1	kg	0 %	(Ningún dato)		
1,1,1-Trichloroethane [Halogenated compound]	1,66E-012	kg	0 %	(Ningún dato)		
1,1,1-Trichloroethane [Halogenated compound]	2,29E-010	kg	0 %	(Ningún dato)		
1,1,2-Trichloroethane [Halogenated compound]	2,54E-011	kg	0 %	(Ningún dato)		
1,2-Dichloroethylene [Halogenated compound]	5,22E-011	kg	0 %	(Ningún dato)		
1,3-Dichloropropene [Organic emission]	1,44E-014	kg	0 %	(Ningún dato)		
1,3-Dioxolan-2-one [Organic emission]	3,59E-009	kg	0 %	(Ningún dato)		
1,4-Diethylbenzene [unspecified]	6,15E-010	kg	0 %	(Ningún dato)		
1,4-Diisopropylbenzene [air unspecified]	5,18E-011	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Butanol [Organic emissions to air]	1,42E-010	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Butanol [Group NMVOC to air]	7,76E-010	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Pentanol [Organic emissions to air]	1,06E-012	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Pentanol [Group NMVOC to air]	4,42E-013	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Pentene [Organic emissions to air]	8,01E-013	kg	0 %	(Ningún dato)		

System: Ninguna modific. Ecoinvent (3.11) Fecha de la última modificación: System01/04/2025 GUID: {C4E0E678-058C-43E7-8B0C-06464AA1B8E}

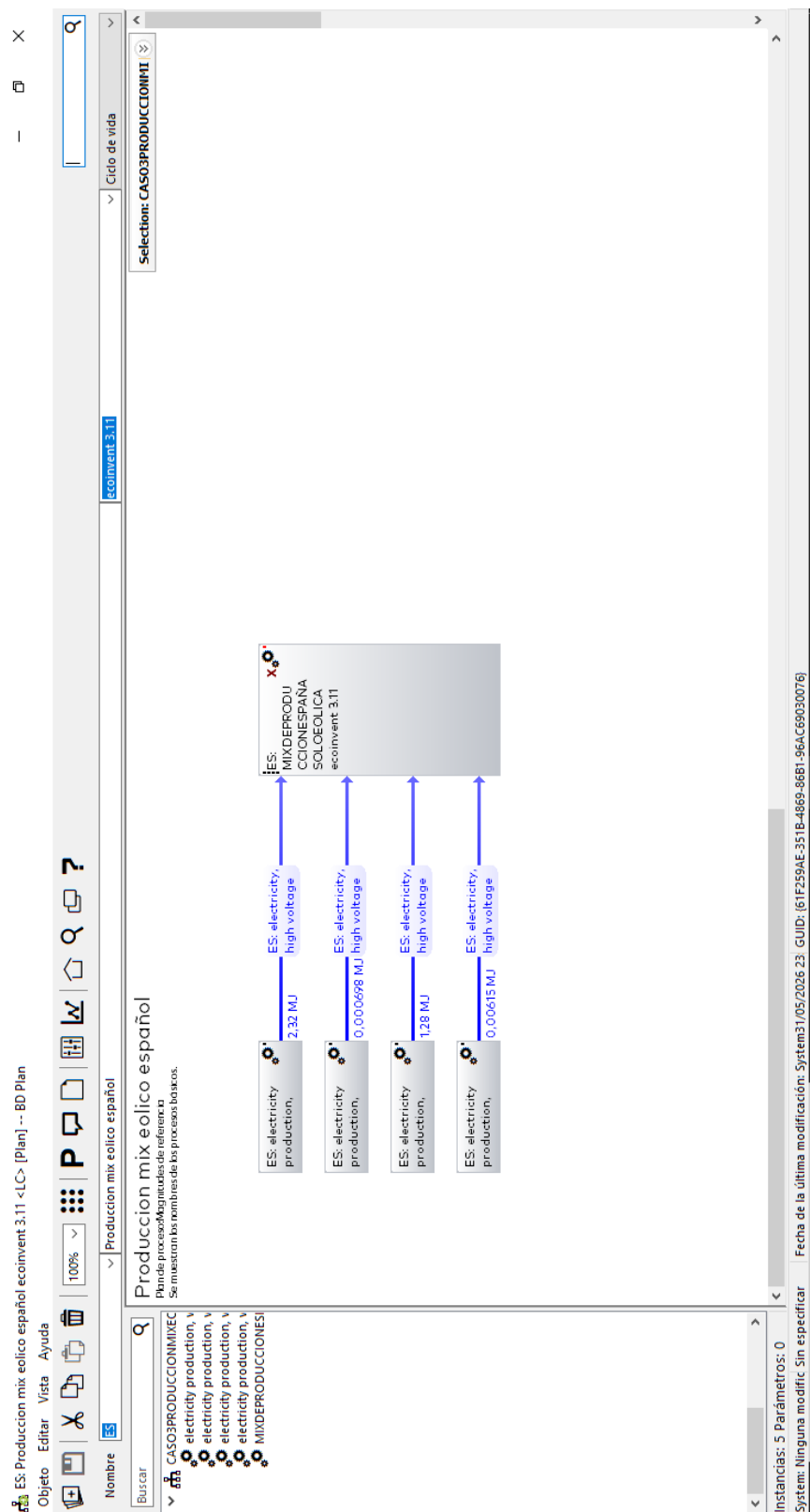
Anexo III. Diagrama de procesos del Escenario 2 en *Sphera GaBi*, correspondiente al modelado del mix eléctrico renovable español 2025 y a la integración de las tecnologías renovables consideradas.



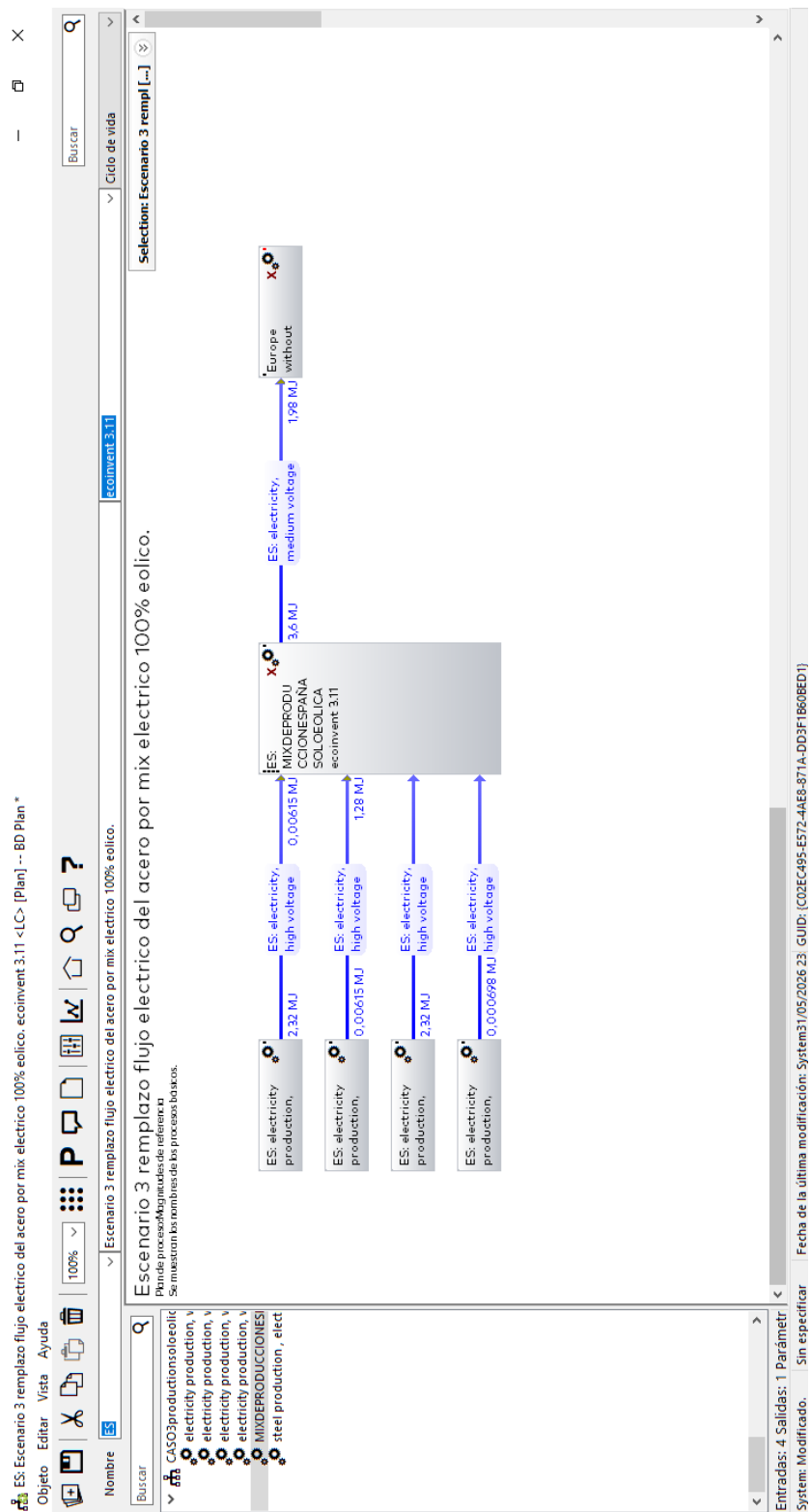
Anexo IV. Estructura de modelado del Escenario 2 en *Sphera GaBi*, mostrando la sustitución del suministro eléctrico original del proceso siderúrgico por el mix eléctrico renovable español desarrollado en este estudio.



Anexo V. Diagrama de procesos del Escenario 3 en *Sphera GaBi*, correspondiente al modelado del sistema eléctrico basado exclusivamente en energía eólica mediante tecnologías terrestres (*onshore*) y marinas (*offshore*).



Anexo VI. Estructura de modelado del Escenario 3 en Sphera GaBi, mostrando la integración del suministro eléctrico 100 % eólico en el proceso de producción de acero de baja aleación.



Anexo VII. Datasets seleccionados en EcoQuery/ecoinvent.

ecoQuery The ecoinvent Year in Review 2025 Looking back on the highlights and key achievements. [Read it now](#)

3.11 - cutoff

Home

Datasets

Resources

Legal & Privacy

What's new

Merçè Segarra
m.segarra@ub.edu

Datasets / steel production, electric, low-alloyed

steel production, electric, low-alloyed

Europe without Switzerland and Austria 2013-2024

Documentation Exchanges Consuming activities LCI results Impact assessment History Export

Exchanges

Exchanges are amounts of a material, energy, or a substance that are transferred between two activities or from one activity to the environment.

Filter exchanges... Show comments

Intermediate (92) Elementary (25)

steel, low-alloyed	REFERENCE PRODUCT	1.00 kg	Show details
anode, for metal electrolysis	TECHNOSPHERE	0.00346 kg	Show details
market for anode, for metal electrolysis, GLO			
argon, liquid	TECHNOSPHERE	0.00109 kg	Show details
market for argon, liquid, RER			
electric arc furnace	TECHNOSPHERE	4.00e-11 unit	Show details
market for electric arc furnace, GLO			
electricity, medium voltage	TECHNOSPHERE	0.00153 kWh	Show details
market for electricity, medium voltage, AL			

ecoQuery The ecoinvent Year in Review 2025 Looking back on the highlights and key achievements. [Read it now](#)

3.11 - cutoff

Home

Datasets

Resources

Legal & Privacy

What's new

Merçè Segarra
m.segarra@ub.edu

Datasets / electricity, high voltage, production mix

electricity, high voltage, production mix

Spain 2020-2024

Documentation Exchanges Consuming activities LCI results Impact assessment History Export

Exchanges

Exchanges are amounts of a material, energy, or a substance that are transferred between two activities or from one activity to the environment.

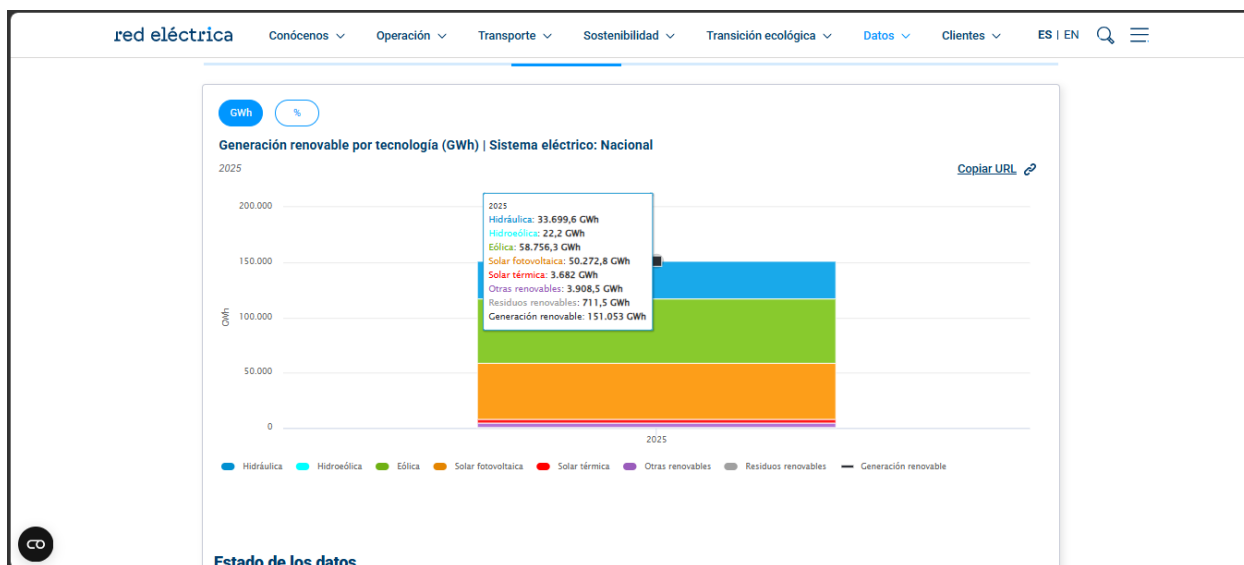
Filter exchanges... Show comments

Intermediate (20) Elementary (0)

electricity, high voltage	REFERENCE PRODUCT	1.00 kWh	Show details
electricity, high voltage	TECHNOSPHERE	0.0197 kWh	Show details
electricity production, hard coal, ES			
electricity, high voltage	TECHNOSPHERE	0.0151 kWh	Show details
electricity production, hydro, pumped storage, ES			
electricity, high voltage	TECHNOSPHERE	0.0509 kWh	Show details
electricity production, hydro, reservoir, non-alpine region, ES			
electricity, high voltage	TECHNOSPHERE	0.0988 kWh	Show details
electricity production, hydro, run-of-river, ES			

<https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/25161/exchanges>

Anexo VIII. Datos originales de REE utilizados para construir el mix.



red eléctrica Conócenos Operación Transporte Sostenibilidad Transición ecológica Datos Clientes ES | EN Q

Acceso Información API

Exportar a Filtar de forma guiada

Vista en gráfica Vista en tabla

Generación renovable por tecnología (GWh) | Sistema eléctrico: Nacional

2025

2025

Hidráulica	33.699,6
Hidroeléctrica	22,2
Eólica	58.756,3
Solar fotovoltaica	50.272,8
Solar térmica	3.682
Otras renovables	3.908,5
Residuos renovables	711,5
Generación renovable	151.053

[Copiar URL](#)

Anexo IX. Cálculo de normalización del mix renovable.

Tabla Mix Energético España 2025 Saved

File Home Insert Share Page Layout Formulas Data Review View Automate Help Draw Picture

Alt Text Bring Forward Send Backward Crop

Picture 2 ✓ ✕ ↺ ↻

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1																				
2			Mix renovable normalizado																	
3			% original																	
4			% normalizado renovable segun REE																	
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				

2025
Hidráulica: 22,3 %
Hidroeléctrica: 0 %
Eólica: 38,9 %
Solar fotovoltaica: 33,2 %
Solar térmica: 2,4 %
Otras renovables: 2,6 %
Residuos renovables: 0,5 %
Generación renovable: 150.985,4 CWh

2025
Hidráulica: 33.684,5 CWh
Hidroeléctrica: 21,9 CWh
Eólica: 58.800,8 CWh
Solar fotovoltaica: 50.187,7 CWh
Solar térmica: 3.681,9 CWh
Otras renovables: 3.900,1 CWh
Residuos renovables: 711,5 CWh
Generación renovable: 150.985,4 CWh

Normalización para Gabi	
Tecnología	kWh
Hidráulica	0,2231
Eólica	0,3894
Solar fotovoltaica	0,3324
Solar térmica	0,0244
Biomasa/biogás- otras renovables	0,0307
	1,0000

Participacion	
Tecnología	kWh
Hidráulica	0,2231
Eólica	0,3894
Solar fotovoltaica	0,3324
Solar térmica	0,0244
Otras renovables (biogás)	0,0358
Residuos renovables	0,0047
Hidroeléctrica	0,0001

OTRAS RENOVABLES (biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica).

RESIDUOS RENOVABLES 0,3 2,58 0,47

Generación renovable 150985,5554 100,00

normalizacionmixenergetico datasets Sheet1 Resultados Sheet4 GENERACIONY% Sheet3 EMISIONCO2% Sheet2 info +

Anexo X. Resultados de la herramienta de Software *Sphera GaBi* para algunos escenarios evaluados en categoría de energía primaria.

PRODUCCION ACERO ESCENARIO 1 31_05_2026 [Balances] -- BD Resultados *

Objeto Editar Vista Herramientas Ayuda

Nombre: PRODUCCION ACERO ESCENARIO 1 31_05_2026

CML 2001 - Aug 2016 EF 3.0 ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) TRACI 2.1 Resultados i-reporte IPCC AR5 GWP100 Recipe End Point primary energy demand from ren. and non ren. resources net calorie value

Cantidad/Peso. Primary energy demand from ren. and non ren. resources (net cal. value) Vista de cantidad Valores absolutos Filas 2

Unidad/Norma. MJ Mostrar unidades de no filtrado Columna 1

ECV LCCS ETCV

Entradas/Salidas ☒ Solo flujos elementales ☐ Separar tablas de E/S Diagrama

Flows	ES: PRODUCC
Resources	9,75
Others	
Emissions to air	
Emissions to fresh water	
Emissions to sea water	
Emissions to agricultural soil	
Emissions to industrial soil	

ES: Escenario 3 rempl...

Objeto Editar Vista

Nombre: Escenario 3 remplazo flujo electrico del acero por mix electrico 100% eolico. Buscar

CML 2001 - Aug 2016 EF 3.0 ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) TRACI 2.1 Resultados i-reporte +

Cantidad/Peso. Primary energy demand from ren. and non ren. resources (net cal. v) Vista de cantidad Valores absolutos Filas 2

Unidad/Norma. MJ Mostrar unidades de no filtrado Columna 1

ECV LCCS ETCV

Entradas/Salidas ☒ Solo flujos elementales ☐ Separar tablas de E/S Diagrama

Flows	ES: Escenario
Resources	4,1
Others	4,1
Emissions to air	
Emissions to fresh water	
Emissions to sea water	
Emissions to agricultural soil	
Emissions to industrial soil	

Anexo XI. Resultados Consolidados de las herramientas de Software

Gabi RESULTADOS		FLUJO RER ELECTRICITY EN ACERO			
Método	IPCC 2013 GWP 100a	ReCiPe Endpoint (H) V1.13			Cumulative Energy Demand LHV
Unidades	kg CO2 eq	Human Health-DALY	Ecosystems-species.yr	Resources-\$	MJ
Mix Energético España 2025	0,03863039	0,00006577706	0,00000015220	0,746694148	4,5567192
Steel	0,54551498	0,03247955367	0,00000113351	8,917382427	9,750977096
Steel + Mix Energético España 2025	0,02124099	0,00003616763	0,00000008369	0,410571046	2,505519775
Mix wind España 2025	0,01953700	0,00006572282	0,00000004377	0,388482446	4,149338218
Steel + Mix wind España 2025	0,01074317	0,00003613041	0,00000002407	0,213655807	2,2815377
SIMAPRO					
Método	IPCC 2013 GWP 100a	ReCiPe 2016 Endpoint (H)			Cumulative Energy Demand LHV
Unidades	kg CO2 eq	Human Health-DALY	Ecosystems-species.yr	Resources-\$	MJ
Mix Energético España 2025	0,17615702	3,6836E-07	7,4E-10	0,02086774	7,2529687
Steel Eco	0,41626911	0,000107795	2,28E-09	0,033394109	8,3430275
Steel Eco + Mix Energético España 2025	0,40141291	0,000107735	2,2E-09	0,032807754	7,648993
Mix wind España 2025	0,01467086	1,9718E-07	9E-11	0,001172443	4,067438
Steel Eco + Mix wind España 2025	0,31261167	3,173E-07	1,3E-10	0,000687516	5,8972697