



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL (MII)

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*COMPARATIVA DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL
DEL CICLO DE VIDA DE LOS VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS Y LOS MOTOR DE COMBUSTIÓN
INTERNA*

Autor: Enrique Vacas Omatos

Director: Miguel Ángel Sanz Bobi

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título COMPARATIVA DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DEL CICLO DE VIDA DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y LOS MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2023/2024 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Enrique Vacas Omatos Fecha: 16/ 09/ 2024



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Firmado por SANZ BOBI MIGUEL ANGEL - ***6599** el día 17/09/2024 con un certificado emitido por AC FNMT Usuarios

Fdo.: Miguel A. Sanz Bobi

Fecha: 17/09/2024



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL (MII)

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*COMPARATIVA DE LA HUELLA MEDIOAMBIENTAL
EN EL CICLO DE VIDA DE LOS VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS Y LOS DE MOTOR DE COMBUSTIÓN
INTERNA*

Autor: Enrique Vacas Omatos

Director: Miguel Ángel Sanz Bobi

Madrid

COMPARATIVA DE LA HUELLA MEDIOAMBIENTAL EN EL CICLO DE VIDA DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y LOS DE MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Autor: Vacas Omatos, Enrique

Director: Sanz Bobi, Miguel Ángel

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

Palabras clave: LCA, Sostenibilidad, Carbono, Ambiental, Renovables, Energía, Impactos, Residuos, Ciclo, Emisiones, BEV, ICEV, Fabricación, Uso, final de vida.

RESUMEN DEL PROYECTO

1.1 DEFINICIÓN DE ESTUDIO

El proyecto detalla el enfoque y estructura del “Life Cycle Assessment” (LCA) para comparar vehículos eléctricos a batería (BEV), y vehículos con motor de combustión interna (ICEV) utilizando un enfoque "Cradle-to-Grave". Esto implica un estudio que cubre todas las etapas desde la producción hasta el final de la vida del vehículo. Las etapas son:

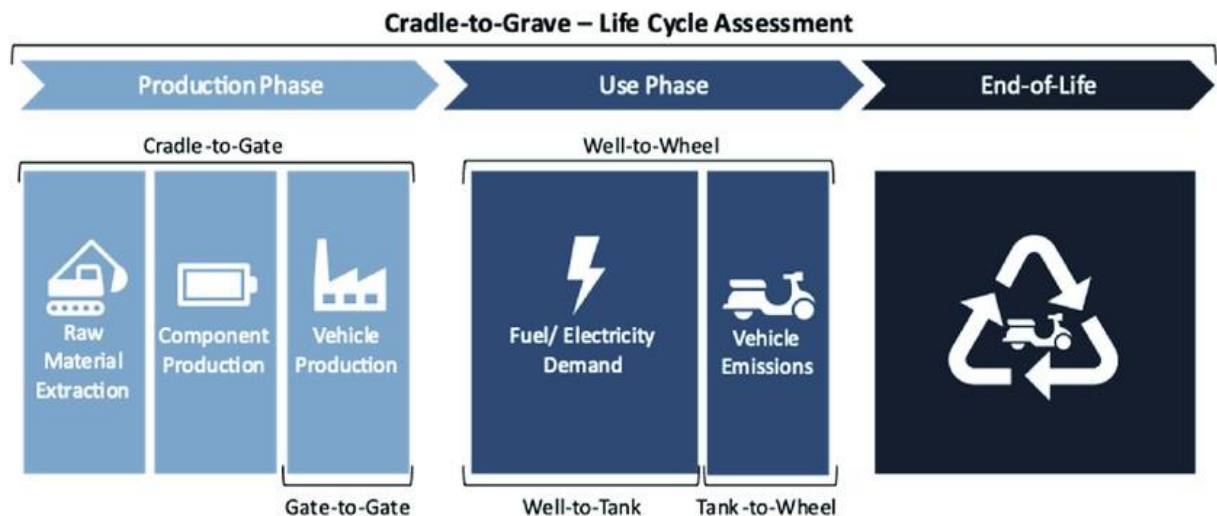


Figura 1: Alcance sistema

El estudio se centra en los componentes que diferencian el BEV del ICEV, excluyendo aquellos que son comunes a todos los vehículos. La comparación se realizará basándose en componentes distintivos de cada tecnología y, por lo tanto, serán los que se modelarán:

Tabla 1: Componentes característicos de ambas tecnologías

Componentes BEV	Componentes ICEV
Motor eléctrico AC	Motor de combustión interna (Gasolina)
Batería de alta tensión	Depósito de gasolina
Inversor (DC/AC) y VCU (Vehicle Control Unit)	Sistema de gases de escape
Cargador On-board	Transmisión
Convertidor DC/DC	Alternador
BMS (Battery management system)	ECU (Electronic Control Unit)
Bomba de calor (calefacción)	
Conectores y cableado del sistema eléctrico	

La vida útil de los vehículos se estima inicialmente en 250,000 km para reflejar un promedio razonable basado en datos variados de la Unión Europea y Estados Unidos, que indican diferencias en el kilometraje medio dependiendo del tipo de vehículo y la región geográfica.

La unidad funcional definida para este LCA es “1 km conducido”, lo cual permite una comparación directa y cuantificable de los impactos ambientales en función de su desempeño y función.

1.2 LIFE CYCLE INVENTORY (LCI)

En este apartado se llevó a cabo la búsqueda de información y, su modelaje en OpenLCA, de los componentes mencionados anteriormente. En la etapa de fabricación, se analiza la construcción de componentes. Cada uno de ellos se estudia en términos de extracción de materiales, fabricación, y esfuerzos de transporte y energía necesarios para su producción. Por ejemplo, el motor eléctrico AC utilizado es un modelo de Brusa que opera a 100 kW y el análisis cubre desde la obtención de las materias primas hasta el producto final ensamblado. Similar detalle se aplica a los demás componentes, asegurando una comprensión del impacto ambiental involucrado en cada paso.

La etapa de uso contempla el análisis de la energía necesaria para operar estos vehículos a lo largo de 250,000 km. Para el BEV, se estudia el consumo energético, estimando 16,03 kWh cada 100 km, y el origen de la electricidad planteando dos situaciones, la de Europa y la de USA, lo cual afecta directamente los impactos ambientales. Los porcentajes son los siguientes:

Tabla 2: Mix energético USA, 2023

LC Stage	Process name	data pt	Units
USA Mix de generación de electricidad	Energía eólica	22.7	%
	Energía hidráulica	9	%
	Energía solar	11.6	%
	Energía nuclear	22	%
	Energía de combustibles fósiles (Carbón)	3	%
	Energía ciclo combinado	25.3	%
	Otros	6.4	%

En este caso, la energía renovable es un 21,4% de la producción total. La segunda localización que se va a modelar es Europa, que presenta el siguiente mix, donde se aprecia que la potencia generada por energía renovable representa el 38,39% del total.

Tabla 3: Mix energético EU, 2022

LC Stage	Process name	data pt	Units
EU Mix de generación de electricidad	Energía eólica	15.06	%
	Energía hidráulica	10.10	%
	Energía solar	7.28	%
	Energía nuclear	21.92	%
	Energía de combustibles fósiles (Carbón)	15.94	%
	Energía ciclo combinado	19.96	%
	Biogeneración	5.95	%

En el caso del ICEV, se considera el consumo de combustible, 6,55 L a los 100 km y las emisiones resultantes del tubo de escape, así como la producción de la gasolina y su impacto.

Finalmente, la etapa de final de vida aborda el reciclaje y la reutilización de los vehículos y sus componentes. Se presta especial atención al reciclaje de baterías en los BEVs y al tratamiento de los vehículos de combustión interna en su totalidad.

1.3 LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT (LCIA)

Se ha decidido representar los resultados en proporción del impacto más alto de cada categoría, con ello se consigue una comparación más visual y directa de los impactos.

1.3.1 RESULTADOS AGRUPADOS

En este apartado se muestran los resultados agrupados en producción, uso y final de vida:

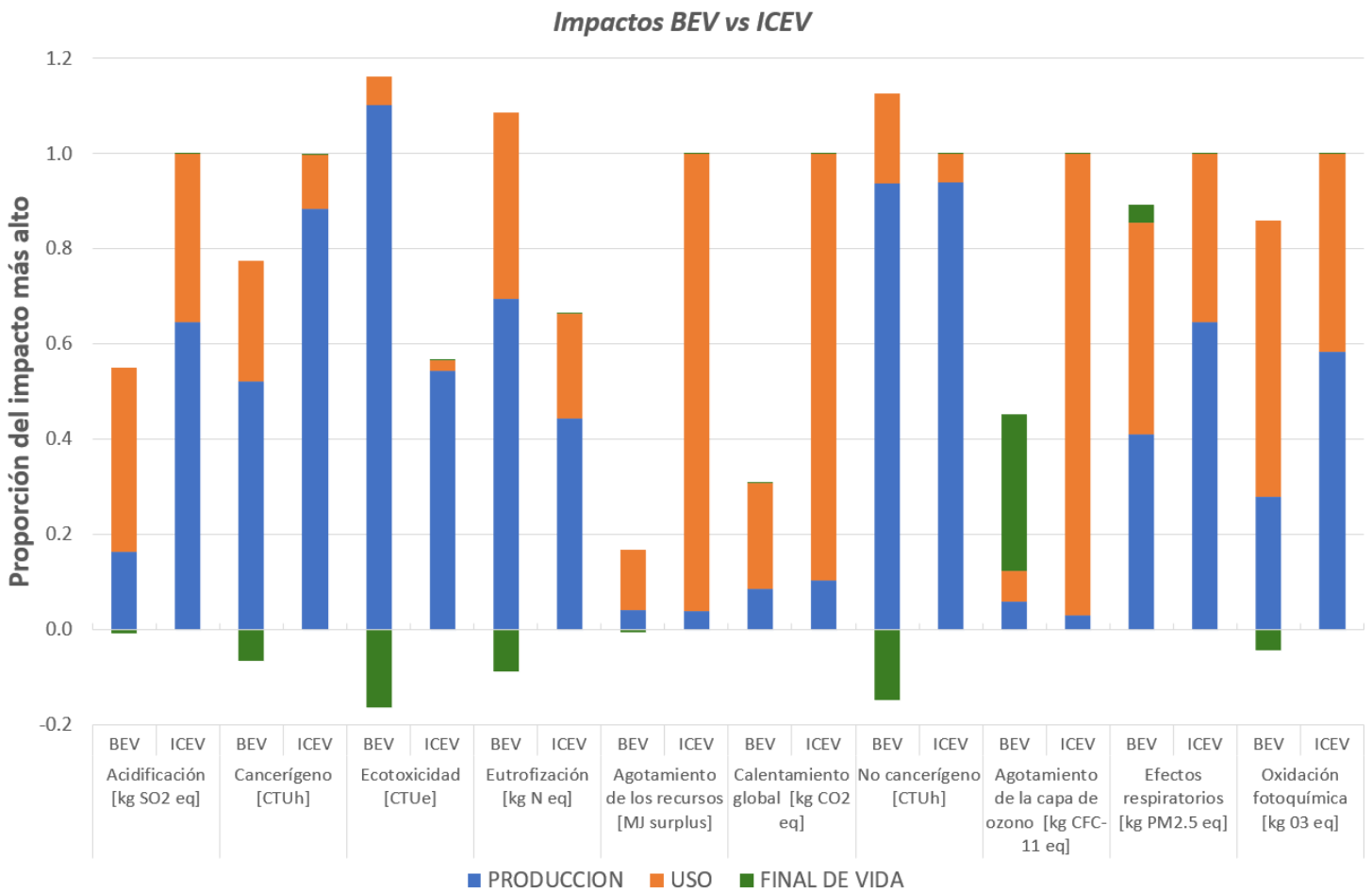


Figura 2: Impactos BEV vs ICEV con un 38,39% de renovables

En primer lugar, para un mejor entendimiento de los resultados, se presenta una tabla en la que se resume las categorías de impactos donde una tecnología ha sido mayor que la otra:

Tabla 4: Tecnología que tiene mayores impactos según categorías

	ICEV	BEV
Acidificación [kg SO2 eq]	X	
Cancerígeno [CTUh]	X	
Ecotoxicidad [CTUe]		X
Eutrofización [kg N eq]		X
Agotamiento de los recursos [MJ surplus]	X	
Calentamiento global [kg CO2 eq]	X	
No cancerígeno [CTUh]	X	
Agotamiento de la capa de ozono [kg CFC-11 eq]	X	
Efectos respiratorios [kg PM2.5 eq]	X	
Oxidación fotoquímica [kg O3 eq]	X	

En términos generales, el vehículo de combustión interna tiene mayores impactos en la mayoría de las categorías, estando bastante igualado en el caso de no carcinogénicos, efectos respiratorios y oxidación fotoquímica. En el caso de acidificación, y carcinogénicos los impactos del BEV representan, respectivamente, el 55% y el 78% de los del ICEV. En contraposición, los impactos del ICEV en ecotoxicidad y eutrofización, representan un 58% y 65% de los del BEV. En el caso del potencial de calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de los recursos, el BEV tiene unas emisiones mucho menores, siendo del 30%, 45% y 18% respectivamente.

Desglosando por etapas, en la etapa de producción, como era de esperar, el BEV tiene un gran peso en muchas categorías. Concretamente, tiene un peso mayor del 80% en carcinogénicos, no carcinogénicos y ecotoxicidad. En la mayoría de las categorías tiene un peso entre el 40-80%. Sin embargo, en el caso de potencial de calentamiento global, eliminación de la capa de ozono y agotamiento de los recursos, los impactos causados por la producción son menores de 20%. Esto se debe a que los principales contaminantes en esas categorías provienen del uso de los vehículos en mayor medida, como se comentará a continuación

Analizando la etapa de uso, sus mayores impactos vienen en las tres categorías anteriores, ya que los principales contaminantes son el CO₂, propio de las emisiones de los ICEV. Además, se produce el agotamiento de los combustibles fósiles mediante la producción de gasolina a través del petróleo. En este proceso también se emiten clorofluorocarbonos (CFC) e hidroclorofluorocarbónoses (HCFC) propiciando el agotamiento de la capa de ozono.

Finalmente, en la etapa de final de vida, mediante el reciclaje de las baterías, se ha conseguido reducir un 15% los impactos causados por ecotoxicidad y no carcinógenos. En menor medida también los carcinógenos y eutrofización. Por el contrario, esto ha generado que el BEV pase del 15% al 45%, respecto del ICEV, en el agotamiento de la capa de ozono.

1.3.2 RESULTADOS DESGLOSADOS

En este apartado se muestran los resultados desglosando la procedencia de cada impacto en la etapa de producción:

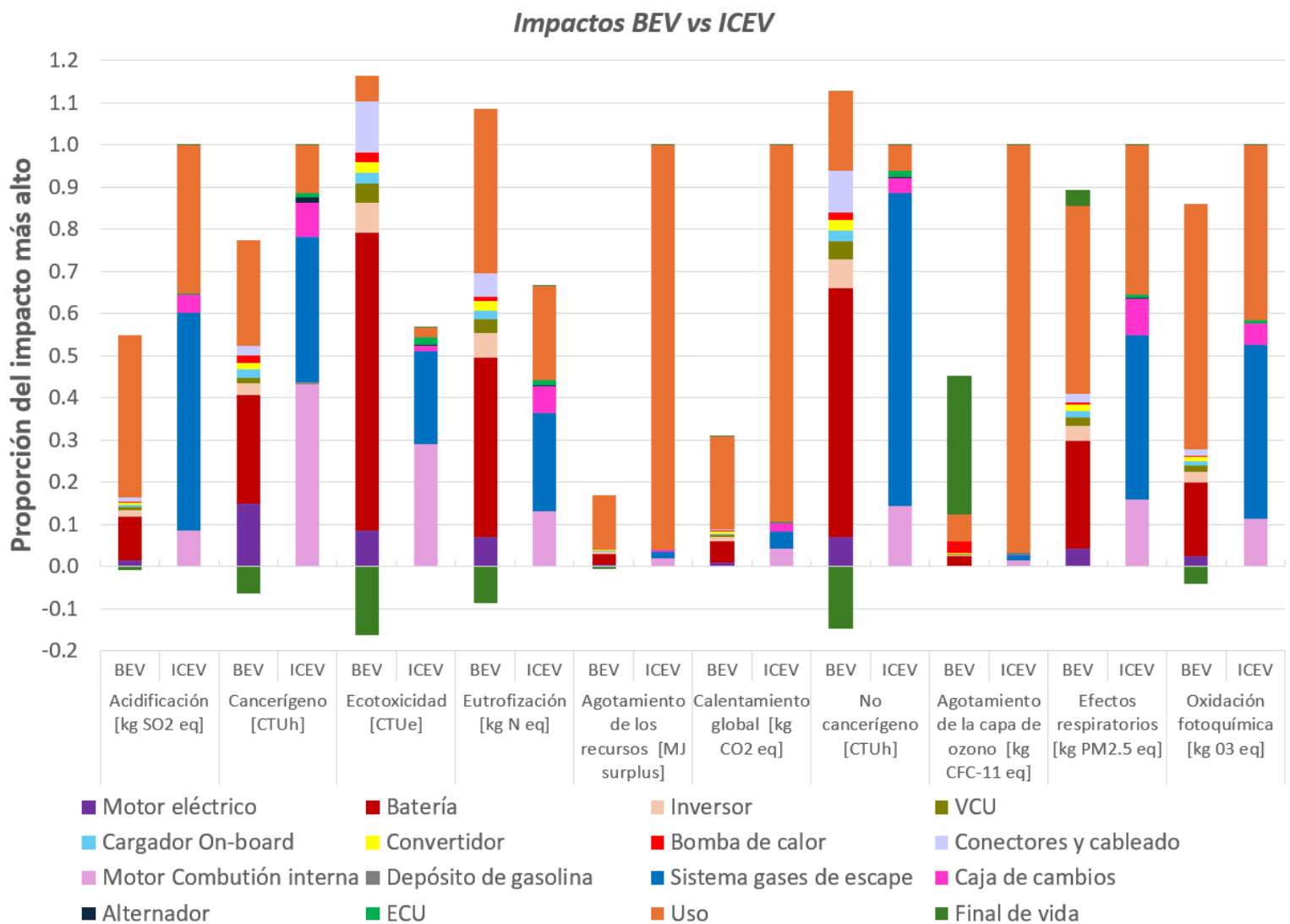


Figura 3: Resultados ICEV vs BEV desglosando los componentes

1.3.2.1 Resultados del BEV

La batería sobresale como el principal contribuyente, particularmente debido a la intensiva extracción de materiales como litio, hierro y fósforo. Este proceso contribuye a más del 80%

de los impactos en categorías como ecotoxicidad, eutroficación y sustancias no carcinógenas, dada su asociación con la degradación del suelo y la contaminación del agua.

El motor eléctrico también es significativo, aportando notablemente a la acidificación a través de emisiones de gases ácidos y afectando otras categorías como carcinógenos y ecotoxicidad, debido a los materiales y procesos utilizados en su fabricación. Además, tiene un papel considerable en la eutroficación, derivado de los procesos industriales.

El inversor impacta entre el 20-30% en las categorías de ecotoxicidad, no carcinógenos y eutroficación, destacando su rol en la liberación de sustancias que pueden ser irritantes o tóxicas, aunque no cancerígenas.

Finalmente, en menor medida, componentes como el VCU, el cargador, el convertidor, y la bomba de calor muestran impactos considerables. El cableado resalta particularmente en ecotoxicidad y no carcinógenos, superando los impactos del inversor y el motor en estas categorías.

1.3.2.2 Resultados del ICEV

Destaca el sistema de gases de escape, específicamente los convertidores catalíticos, el cual tiene una incidencia significativa en casi todas las categorías ambientales. Los procesos y materiales involucrados en su producción, como los óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), contribuyen a la acidificación y eutrofización al reaccionar en la atmósfera y formar ácidos que precipitan como lluvia ácida. Esta precipitación afecta negativamente tanto a ecosistemas acuáticos como terrestres. Además, los metales pesados y químicos peligrosos utilizados en la fabricación de convertidores catalíticos, como el níquel y el cromo, representan un 30% de los impactos en carcinogénicos y un 75% en no carcinógenos, debido a su potencial para incrementar el riesgo de cáncer y otros efectos adversos para la salud.

El motor de combustión interna también genera impactos ambientales considerables, contribuyendo en un 50% a los carcinogénicos debido al uso de químicos y solventes que incluyen compuestos orgánicos volátiles en pinturas, lubricantes y recubrimientos. Este proceso libera humos y partículas finas que contienen metales durante el mecanizado y tratamiento térmico de piezas metálicas. Además, el motor es responsable del 55% de la

ecotoxicidad, impactada por los residuos y emisiones que incluyen metales pesados e hidrocarburos. También contribuye en un 33% a la eutrofización a través de la liberación de nitratos y fosfatos en aguas residuales industriales que promueven el crecimiento excesivo de algas, afectando la vida acuática.

Por último, la caja de cambios, cuyo proceso de fabricación es similar al del motor, incide principalmente en carcinogénicos (12.5%), eutrofización (20%) y efectos respiratorios (18%). Durante su fabricación, se emplean diversos lubricantes y aceites que pueden contener químicos peligrosos y generar partículas y polvo, contribuyendo así a las emisiones que afectan la calidad del aire y la salud respiratoria.

1.3.3 ANÁLISIS CO₂

1.3.3.1 Etapa de producción

Si se tiene en cuenta que se ha establecido que la vida útil de la batería es de 250.000km y se contempla un escenario en el que el coche va a alcanzar 500.000km, los resultados serían los siguientes:

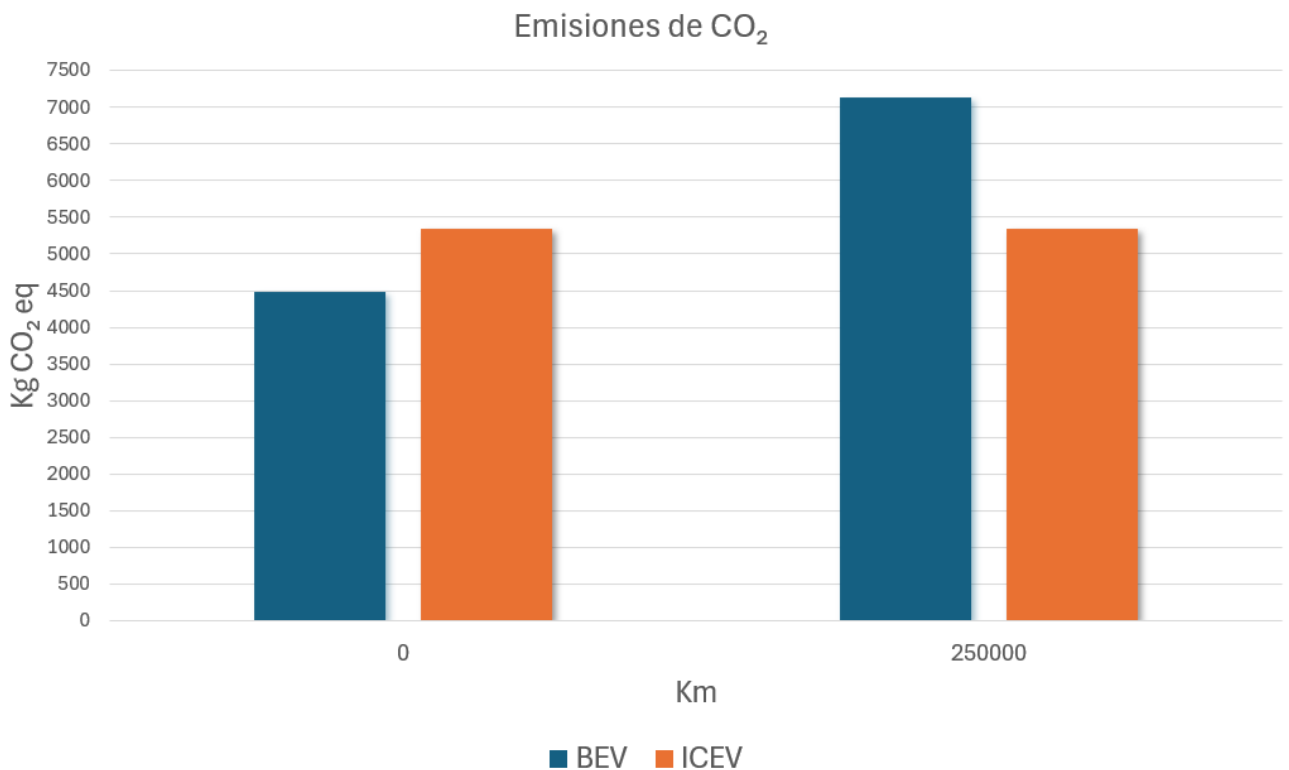


Figura 4: Emisiones de CO₂ con cambio de batería

Se muestra el caso base en el año 0, donde no haría falta cambiar la batería si no se superan los 250.000. En el escenario de que fuera necesario el reemplazo de la batería, las emisiones del BEV serían un 31,14% mayores que las del ICEV en la etapa de fabricación.

1.3.3.2 Ciclo de vida entero

En este caso se va a mostrar las emisiones de CO₂ en el ciclo entero de vida, teniendo en cuenta también el uso y el final de vida. No se ha considerado el reemplazo de ningún elemento en ninguna de las tecnologías excepto la batería cada 250.000km.

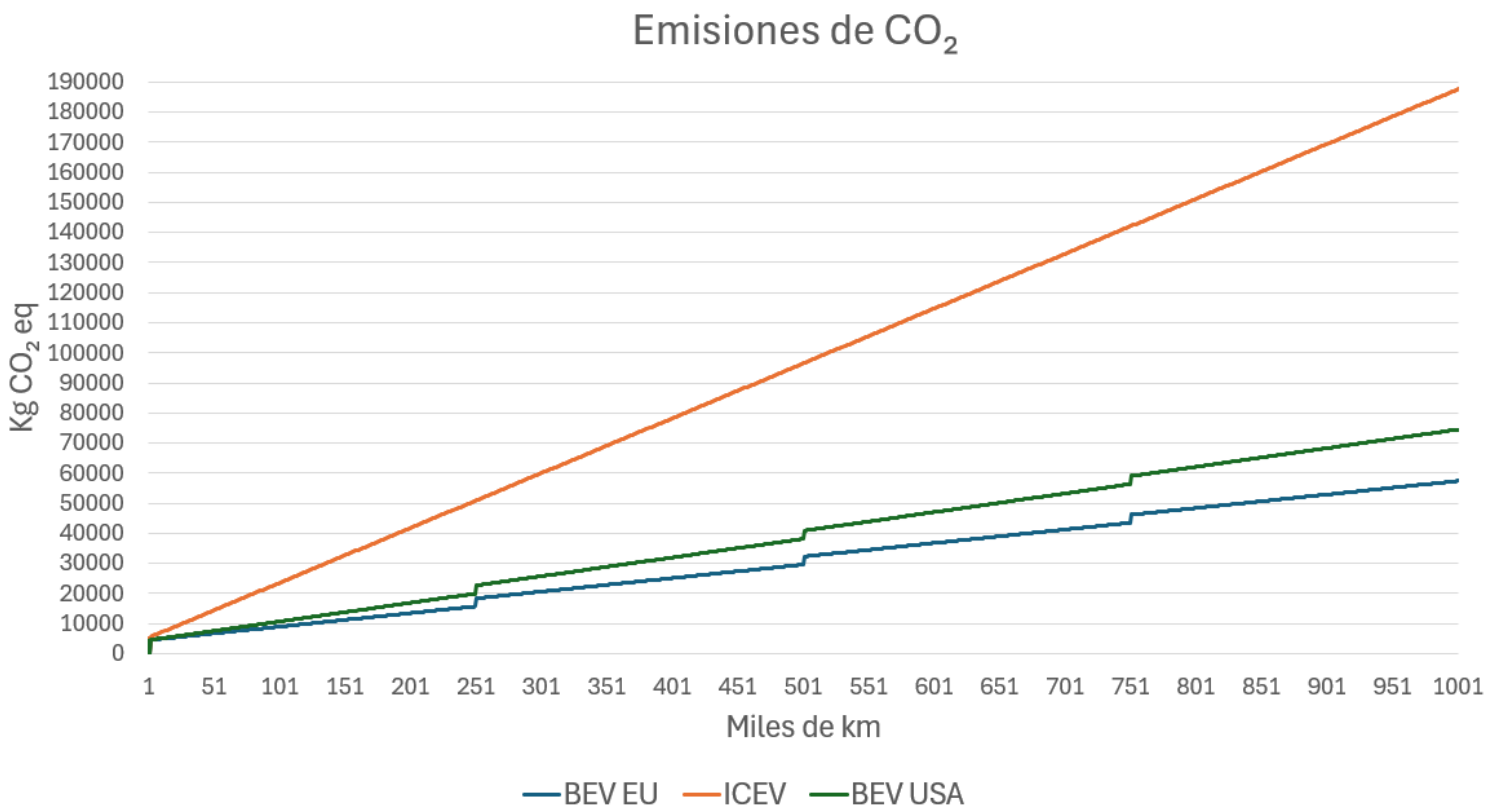


Figura 5: Emisiones de CO₂ en el ciclo de vida entero

Se aprecia como la gráfica empieza con el valor de emisiones de la producción, vistas anteriormente, y poco a poco van aumentando según los km que se van recorriendo. También se ve claramente como cada 250.000km hay un incremento debido al reemplazo de la batería. Aún con las emisiones de la nueva batería, la cantidad de emisiones total no es comparable con las del ICEV en ese momento.

Como conclusión en las emisiones de CO₂, las generadas por el ICEV durante la etapa de uso son mucho mayores que las BEV, lo cual hace que, observando el ciclo de vida entero y teniendo en cuenta los reemplazos de batería, las emisiones de CO₂ de los BEV en Europa

sean del 35,14% a los 250.000km. En un caso menos bueno, como es el de USA, las emisiones de CO₂ del BEV siguen representando un 44% del ICEV.

1.3.4 ANÁLISIS SO_x

En la siguiente figura se muestran los resultados en la etapa de fabricación:

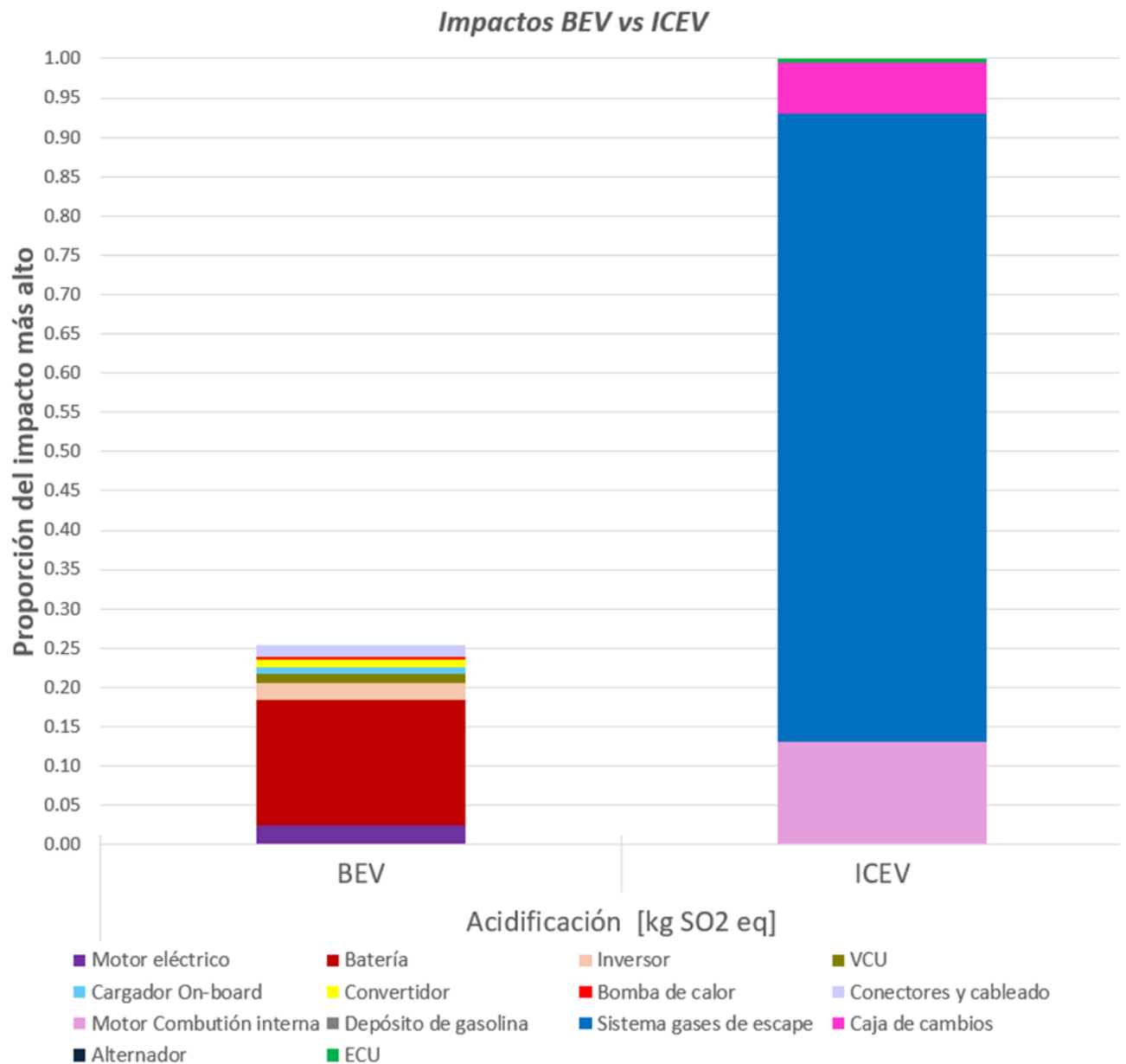


Figura 6: Emisiones de SO₂ en la etapa de fabricación

- Las emisiones del BEV representan el 25% de las del ICEV, siendo la principal emisora la fabricación de la batería con un 16%. En menor medida se tiene el motor eléctrico y el inversor que representan un 2,5% cada uno y, finalmente cada uno de los demás componentes alrededor de 1%.

- En el caso del ICEV, el mayor emisor es el sistema de gases de escape con un 80%, debido al convertidor catalítico, el cual conlleva para su fabricación la extracción y refinación de metales preciosos como el platino, el paladio o el rodio, que posteriormente se calientan a altas temperaturas, lo que puede liberar dióxido de azufre. Además, se necesita mucha energía que, si proviene de la quema de combustibles fósiles, se emitirá más SO₂ durante el proceso. Análisis NO_x

1.3.4.1 Eutrofización

En presencia de luz solar y compuestos orgánicos volátiles, los NO_x reaccionan para formar ozono. Aunque el ozono en la estratosfera protege contra la radiación ultravioleta, a nivel del suelo es un contaminante nocivo que puede causar o agravar problemas respiratorios, dañar cultivos, etc. Además, contribuyen a la eutrofización de las masas de agua.

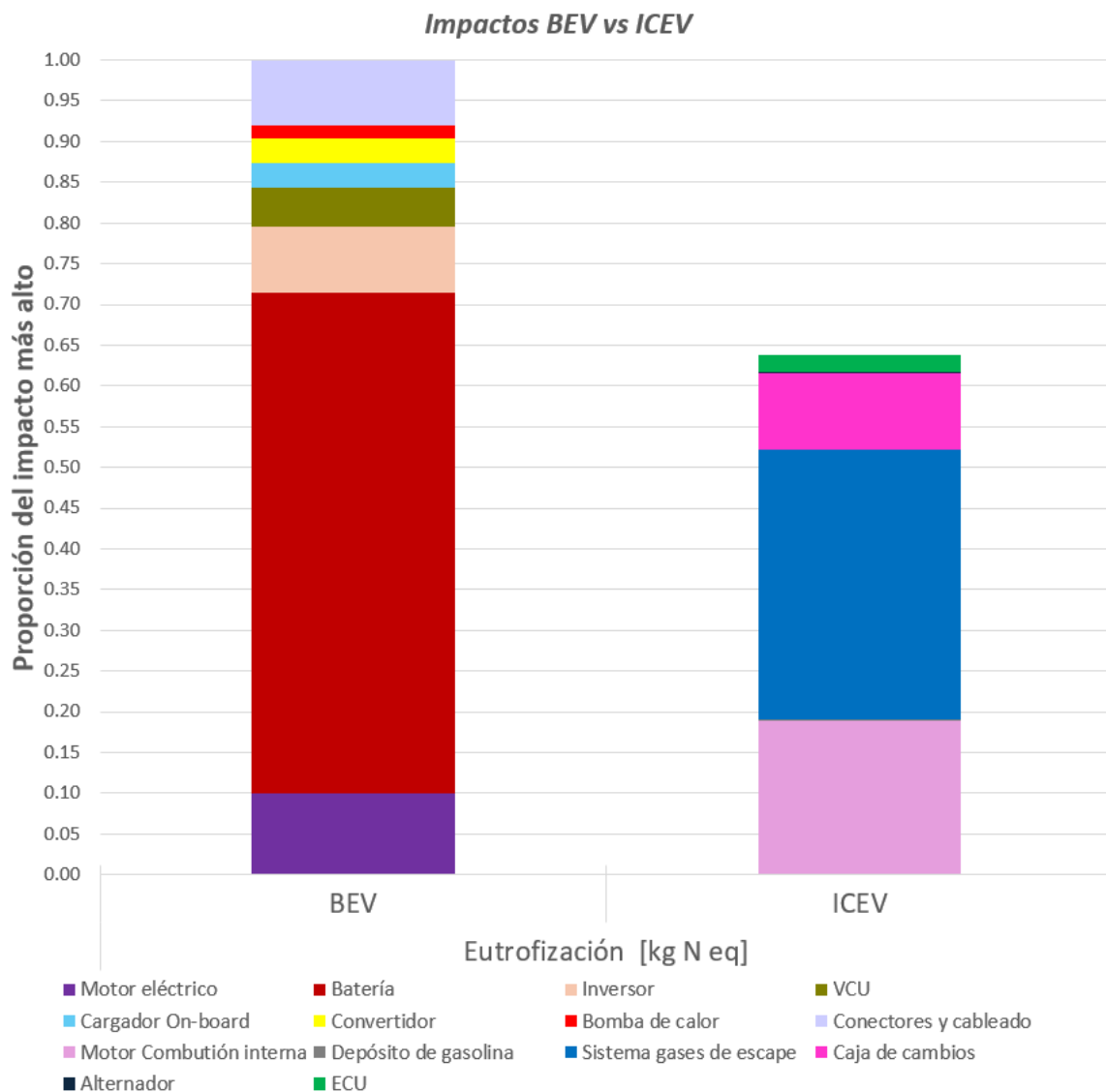


Figura 7: Emisiones potenciadoras de Eutrofización en la etapa de fabricación

- El principal emisor es la batería, representando un 60% de los impactos, debido a los procesos de la extracción de las materias primas como hierro, fósforo o litio. También por el procesamiento de litio o la síntesis de los compuestos de fosfato. La energía utilizada también es importante ya que la quema de combustibles fósiles es un gran emisor de NO_x. En menor medida se tiene el motor eléctrico, el inversor y el cableado, con un 10%, 8% y 8% respectivamente.
- Por parte del ICEV, al igual que en la emisión de dióxido de azufre, el convertidor catalítico es el principal emisor con un 34%, seguido del motor de combustión interna y la caja de cambios, 19% y 10%.

1.3.4.2 Oxidación fotoquímica (“Smog”)

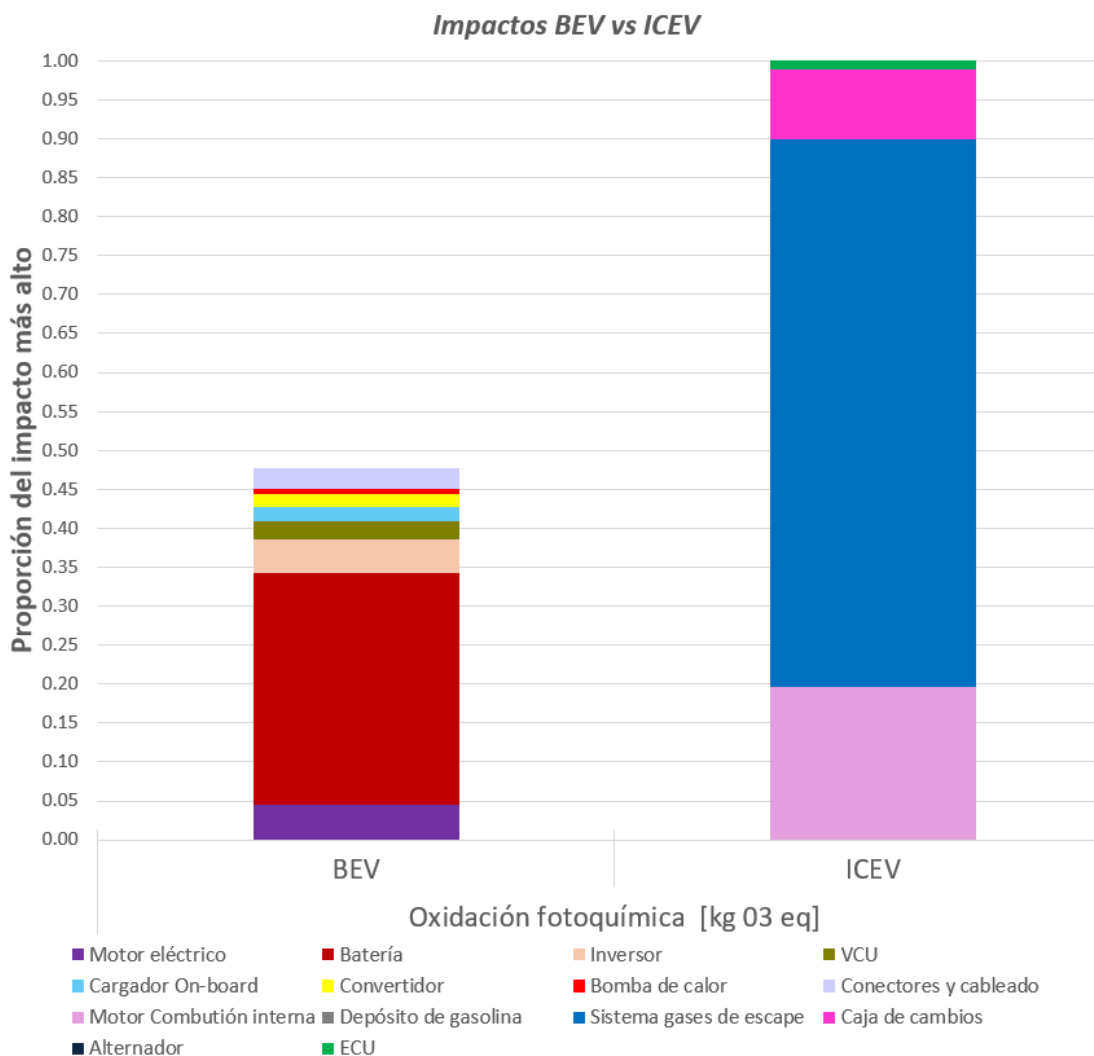


Figura 8: Emisiones potenciadoras de formación de Smog en la etapa de fabricación

En este caso el ICEV tiene mayor potencial de formación de Smog, siendo otra vez el principal emisor el convertidor catalítico representando el 70%. El motor de combustión

interna representa el 20% y la caja de cambios el 9%. Siguiendo el patrón de los anteriores impactos en el BEV, la batería representa la mayoría, alrededor de un 30%, y le siguen los demás componentes.

1.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad es fundamental para determinar cómo las variaciones en los datos de entrada del modelo afectan los resultados obtenidos, evaluando así la robustez de estos resultados y identificando las variables que más influyen en los impactos ambientales.

En este análisis se consideran tres variaciones principales: el consumo de energía del BEV, medido en kWh/100 km, para analizar cómo afecta la eficiencia energética a los impactos ambientales; el cambio en el consumo de combustible del ICEV, evaluado en L/100km, para entender la influencia de la eficiencia del motor y las prácticas de conducción; y la variación en el porcentaje de energía renovable utilizada en la carga, destacando cómo la fuente de electricidad puede alterar significativamente los resultados del LCA.

Véase los resultados en las gráficas del apartado 6.4 Análisis de sensibilidad.

1.5 CONCLUSIÓN

Para concluir el proyecto, se van a resumir los puntos clave basados en los resultados obtenidos:

- En términos generales, el BEV presenta menores impactos en la mayoría de las categorías evaluadas, particularmente en potencial de calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de recursos, mostrando solo el 30%, 45% y 18% de los impactos comparados con el ICEV, respectivamente.
- La producción de BEV tiene un impacto considerablemente mayor en categorías como eutrofización, no carcinogénicos y ecotoxicidad, debido principalmente a la fabricación de la batería. Sin embargo, en la etapa de uso y final de vida, considerando su reciclaje o segundo uso, el BEV tiende a ser más amigable con el medio ambiente.

- En cuanto a emisiones de CO₂, las generadas por el ICEV durante la etapa de uso son mucho mayores que las BEV, lo cual hace que, observando el ciclo de vida entero y teniendo en cuenta el reemplazo de batería, las emisiones de CO₂ de los BEV en Europa sean del 35,14% a los 250.000km. En un caso menos bueno, como es el de USA, las emisiones de CO₂ del BEV siguen representando un 44% del ICEV.
- Los resultados varían significativamente dependiendo del mix energético utilizado para la operación de los vehículos. En regiones con una alta proporción de energías renovables, el BEV presenta muchos menores impactos ambientales en comparación con el ICEV.

COMPARISON OF THE ENVIRONMENTAL FOOTPRINT IN THE LIFE CYCLE OF ELECTRIC VEHICLES AND INTERNAL COMBUSTION ENGINE VEHICLES

Author: Vacas Omatos, Enrique

Director: Sanz Bobi, Miguel Ángel

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

Keywords: LCA, Sustainability, Carbon, Environmental, Renewables, Energy, Impacts, Waste, Cycle, Emissions, BEV, ICEV, Manufacturing, Use, End-of-Life.

PROJECT SUMMARY

1.6 STUDY DEFINITION

The project outlines the approach and structure of the “Life Cycle Assessment” (LCA) to compare battery electric vehicles (BEV) and internal combustion engine vehicles (ICEV) using a "Cradle-to-Grave" approach. This involves a study covering all stages from production to the end of the vehicle’s life. The stages are:

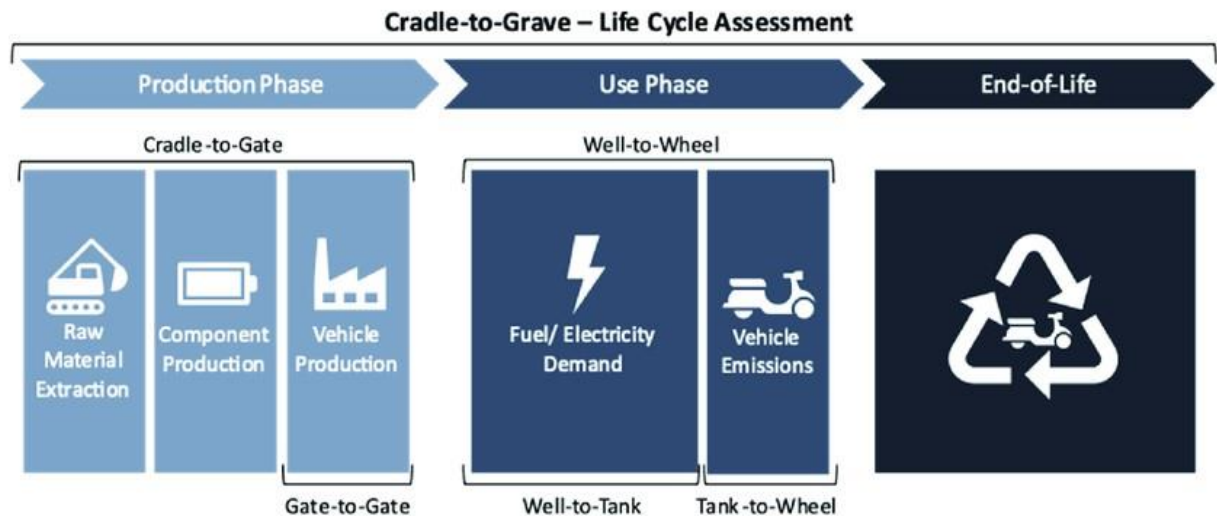


Figure 9: System Scope

The study focuses on the components that differentiate BEV from ICEV, excluding those common to all vehicles. The comparison will be based on distinctive components of each technology and thus will be modeled accordingly:

Table 5: Characteristic components of both technologies

BEV Components	ICEV Components
AC electric motor	Internal combustion engine (Gas)
High voltage battery	Gasoline tank
Inverter (DC/AC) and VCU	Exhaust system
On-board charger	Transmission
DC/DC converter	Alternator
BMS (Battery management system)	ECU (Electronic Control Unit)
Heat pump (heating)	
Connectors and wiring of the electric system	

The vehicles' lifespan is initially estimated at 250,000 km to reflect a reasonable average based on varied data from the European Union and the United States, which show differences in average mileage depending on vehicle type and geographic region.

The functional unit defined for this LCA is "1 km driven," allowing for a direct and quantifiable comparison of environmental impacts based on their performance and function.

1.7 LIFE CYCLE INVENTORY (LCI)

In this section, information was gathered and modeled in OpenLCA for the components mentioned above. In the manufacturing stage, the construction of components is analyzed. Each one is studied in terms of material extraction, manufacturing, transportation, and energy efforts needed for its production. For example, the AC electric motor used is a 100 kW Brusa model, and the analysis covers everything from raw material extraction to the final assembled product. Similar detail applies to other components, ensuring an understanding of the environmental impact involved in each step.

The use stage covers the energy analysis required to operate these vehicles over 250,000 km. For the BEV, energy consumption is studied, estimating 16.03 kWh per 100 km, and the electricity source is considered in two scenarios: Europe and the USA, directly affecting the environmental impacts. The percentages are as follows::

Table 6: Energy Mix USA, 2023

LC Stage	Process name	data pt	Units
USA Mix de generación de electricidad	Energía eólica	22.7	%
	Energía hidráulica	9	%
	Energía solar	11.6	%
	Energía nuclear	22	%
	Energía de combustibles fósiles (Carbón)	3	%
	Energía ciclo combinado	25.3	%
	Otros	6.4	%

In this case, renewable energy accounts for 21.4% of the total production. The second location to be modeled is Europe, which presents the following mix, where renewable energy represents 38.39% of the total.

Table 7: Energy Mix EU, 2022

LC Stage	Process name	data pt	Units
EU Mix de generación de electricidad	Energía eólica	15.06	%
	Energía hidráulica	10.10	%
	Energía solar	7.28	%
	Energía nuclear	21.92	%
	Energía de combustibles fósiles (Carbón)	15.94	%
	Energía ciclo combinado	19.96	%
	Biogeneración	5.95	%

For ICEV, fuel consumption is considered, at 6.55 L per 100 km, as well as exhaust emissions and gasoline production and its impact.

Finally, the end-of-life stage addresses the recycling and reuse of vehicles and their components. Special attention is given to battery recycling in BEVs and the treatment of internal combustion vehicles as a whole.

1.8 LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT (LCIA)

Results are represented as a proportion of the highest impact in each category, allowing for a more visual and direct comparison of impacts.

1.8.1 RESULTADOS AGRUPADOS

This section presents results grouped by production, use, and end-of-life:

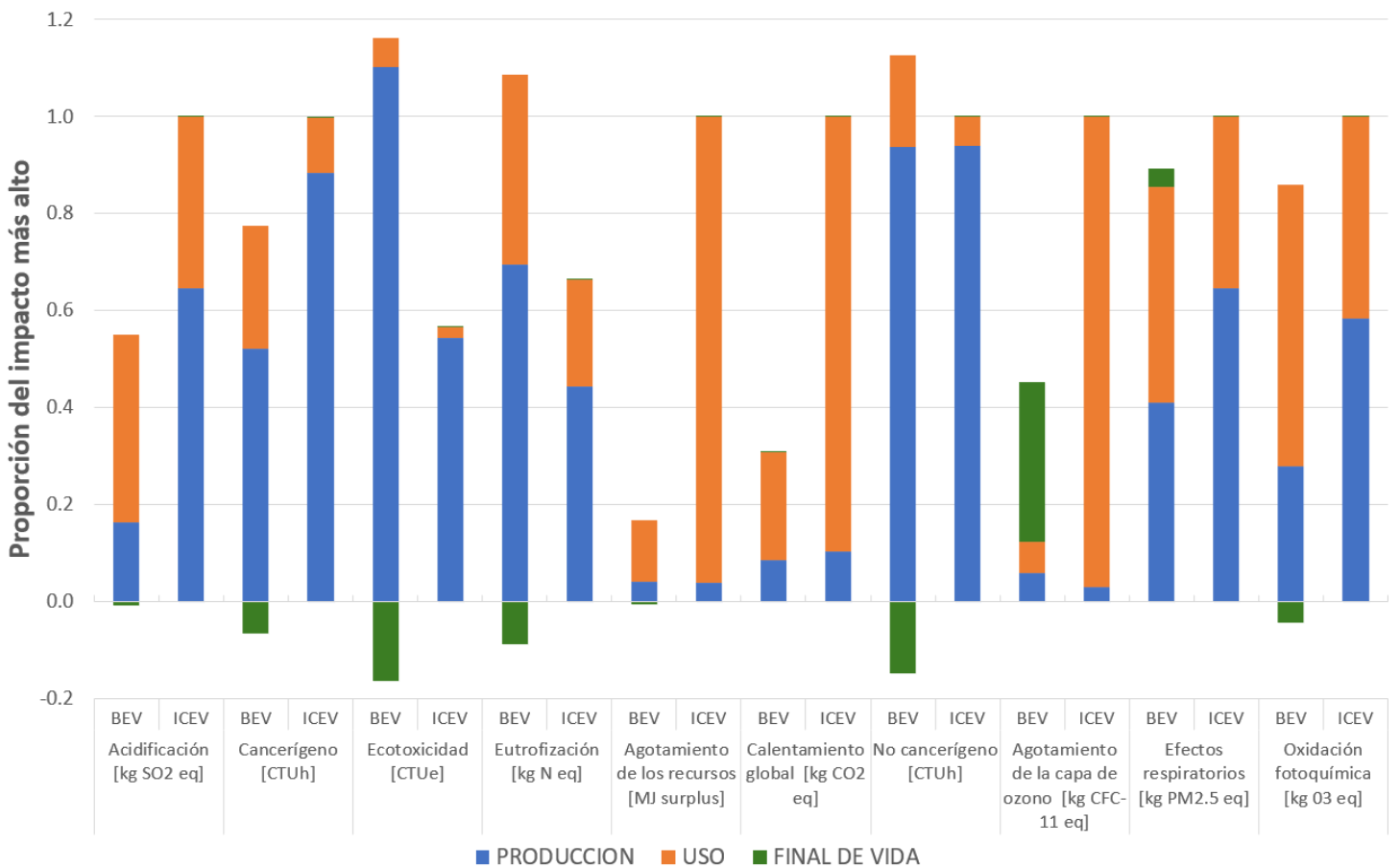


Figure 10: Impacts BEV vs ICEV with 38,39% of renewables

First, for better understanding, a table summarizes the impact categories where one technology exceeds the other:

Table 8: Technology with greater impacts by category

	ICEV	BEV
Acidificación [kg SO2 eq]	X	
Cancerígeno [CTUh]	X	
Ecotoxicidad [CTUe]		X
Eutrofización [kg N eq]		X
Agotamiento de los recursos [MJ surplus]	X	
Calentamiento global [kg CO2 eq]	X	
No cancerígeno [CTUh]	X	
Agotamiento de la capa de ozono [kg CFC-11 eq]	X	
Efectos respiratorios [kg PM2.5 eq]	X	
Oxidación fotoquímica [kg O3 eq]	X	

In general, internal combustion vehicles have higher impacts in most categories, with a close comparison in non-carcinogenics, respiratory effects, and photochemical oxidation. In the case of acidification and carcinogenics, BEV impacts represent 55% and 78% of ICEV impacts, respectively. Conversely, ICEV impacts in ecotoxicity and eutrophication represent 58% and 65% of BEV impacts. Regarding global warming potential, ozone depletion, and resource depletion, BEV emissions are much lower, at 30%, 45%, and 18%, respectively.

Breaking it down by stages:

Production stage: BEV has a large impact in many categories, with over 80% in carcinogenics, non-carcinogenics, and ecotoxicity. However, in global warming potential, ozone depletion, and resource depletion, production impacts are under 20%.

Use stage: The biggest impacts are seen in the three categories above, mainly from CO2 emissions from ICEVs and fossil fuel depletion.

End-of-life stage: Recycling batteries has reduced ecotoxicity and non-carcinogen impacts by 15%, with lesser reductions in carcinogenics and eutrophication. However, this has increased BEV impacts from 15% to 45% in ozone depletion compared to ICEVs.

1.8.2 DETAILED RESULTS

This section shows the results with a breakdown of the origin of each impact in the production stage.:

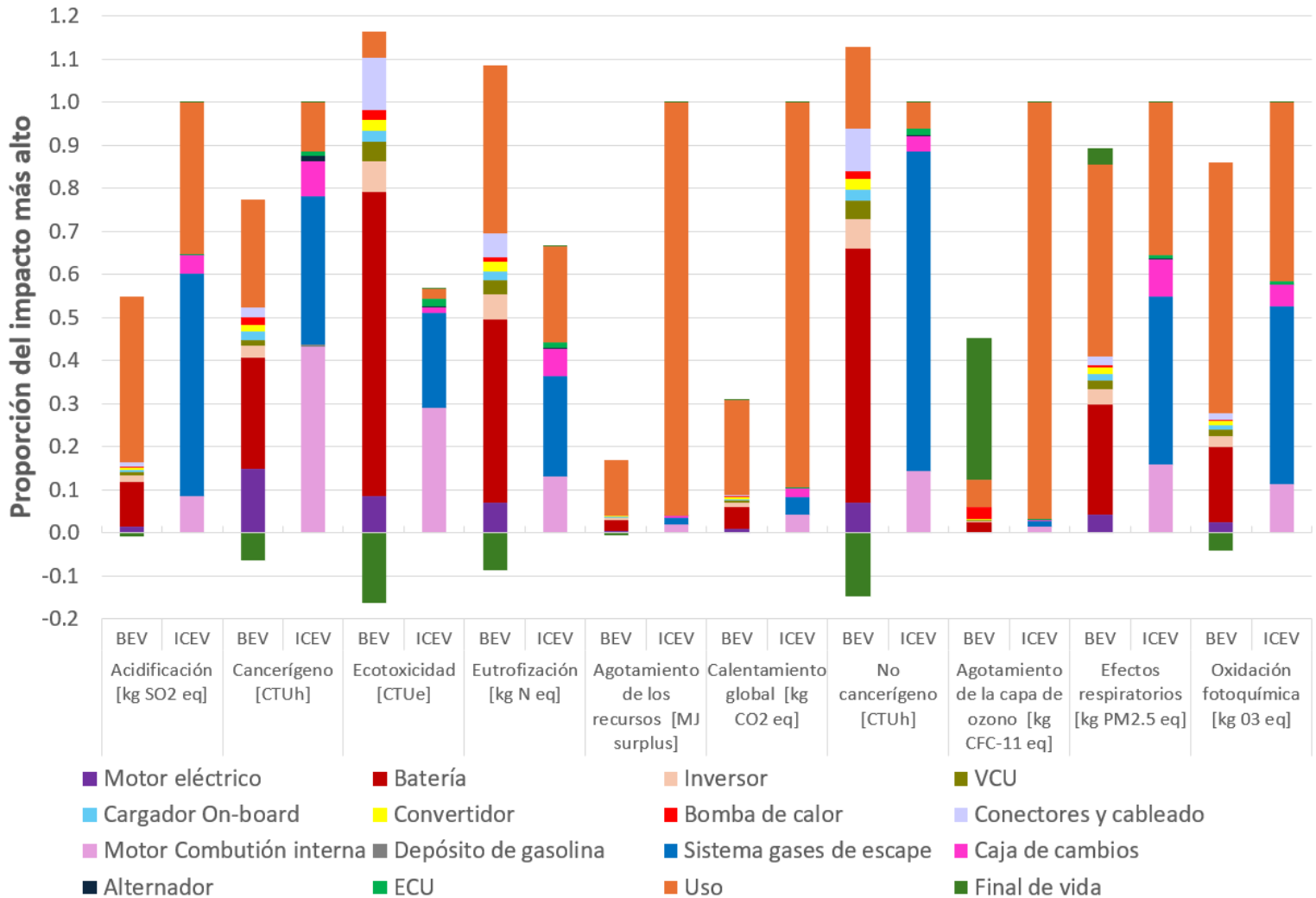


Figure 11: Resultados ICEV vs BEV desglosando los componentes

1.8.2.1 BEV Results

The battery stands out as the main contributor, particularly due to the intensive extraction of materials such as lithium, iron and phosphorus. This process contributes to more than 80% of the impacts in categories such as ecotoxicity, eutrophication and non-carcinogenic substances, given its association with soil degradation and water pollution.

The electric motor is also significant, contributing significantly to acidification through acid gas emissions and affecting other categories such as carcinogens and ecotoxicity, due to the materials and processes used in their manufacture. In addition, it plays a considerable role in eutrophication, derived from industrial processes.

The inverter has an impact of 20-30% in the ecotoxicity, non-carcinogenic and eutrophication categories, highlighting its role in the release of substances that can be irritating or toxic, although not carcinogenic.

Finally, to a lesser extent, components such as the VCU, charger, converter, and heat pump show considerable impacts. The cabling particularly stands out in ecotoxicity and non-carcinogenicity, surpassing the impacts of the inverter and motor in these categories.

1.8.2.2 Resultados del ICEV

The exhaust gas system, specifically catalytic converters, has a significant impact on almost all environmental categories. The processes and materials involved in their production, such as sulfur oxides (SO_x) and nitrogen oxides (NO_x), contribute to acidification and eutrophication by reacting in the atmosphere and forming acids that precipitate as acid rain. This precipitation negatively affects both aquatic and terrestrial ecosystems. In addition, heavy metals and hazardous chemicals used in the manufacture of catalytic converters, such as nickel and chromium, account for 30% of the carcinogenic and 75% of the non-carcinogenic impacts, due to their potential to increase the risk of cancer and other adverse health effects.

The internal combustion engine also generates considerable environmental impacts, contributing 50% to carcinogens due to the use of chemicals and solvents that include volatile organic compounds in paints, lubricants and coatings. This process releases fumes and fine particles containing metals during machining and heat treatment of metal parts. In addition, the engine is responsible for 55% of ecotoxicity, impacted by residues and emissions that include heavy metals and hydrocarbons. It also contributes 33% to eutrophication through the release of nitrates and phosphates in industrial wastewater that promote excessive algae growth, affecting aquatic life.

Finally, the gearbox, whose manufacturing process is similar to that of the engine, has a major impact on carcinogens (12.5%), eutrophication (20%) and respiratory effects (18%). During its manufacture, various lubricants and oils are used that may contain hazardous

chemicals and generate particles and dust, thus contributing to emissions that affect air quality and respiratory health.

1.8.3 CO₂ ANALYSIS

1.8.3.1 Production stage

If we take into account that the useful life of the battery has been established as 250,000 km and we consider a scenario in which the car will reach 500,000 km, the results would be as follows:

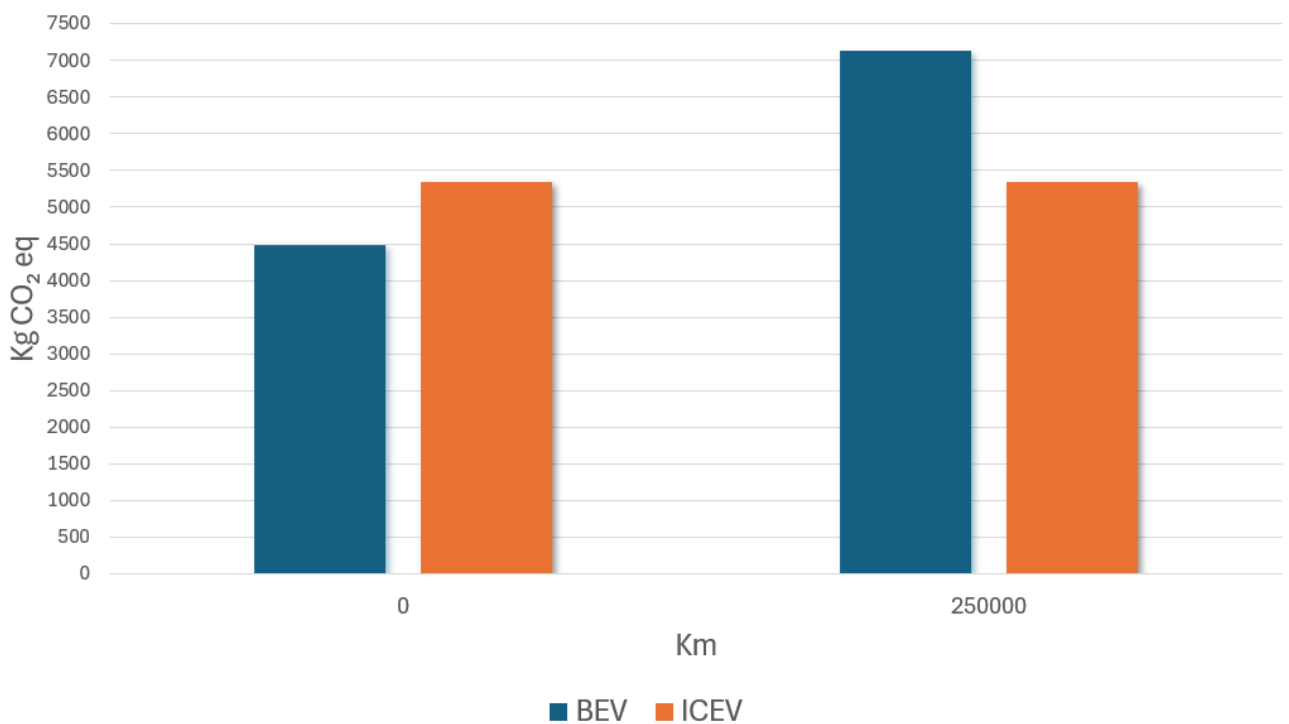


Figure 12: CO₂ emissions with battery replacement

The base case is shown in year 0, where the battery would not need to be replaced if it does not exceed 250,000. In the scenario where battery replacement would be necessary, BEV emissions would be 31.14% higher than those of the ICEV at the manufacturing stage.

1.8.3.2 Entire life cycle

In this case, the CO₂ emissions will be shown for the entire life cycle, taking into account also the use and end of life. No element replacement has been considered in any of the technologies except the battery every 250,000km.

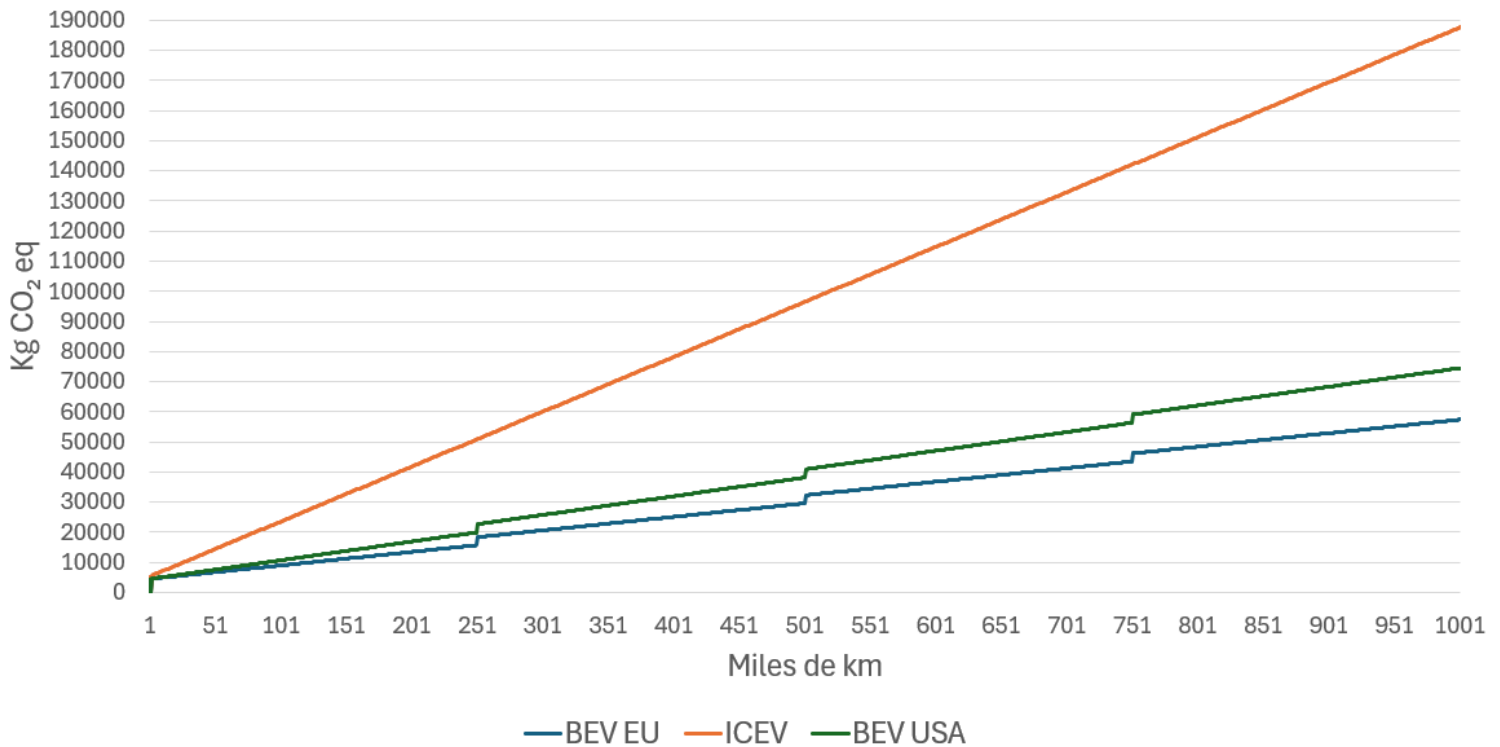


Figure 13: CO₂ emissions in the entire life cycle

It can be seen how the graph starts with the emissions value of the production, seen previously, and little by little they increase according to the km driven. It is also clear how every 250,000km there is an increase due to battery replacement. Even with the emissions of the new battery, the total amount of emissions is not comparable to those of the ICEV at that time.

As a conclusion on CO₂ emissions, those generated by the ICEV during the use stage are much higher than BEVs, which makes that, looking at the whole life cycle and taking into account battery replacements, the CO₂ emissions of BEVs in Europe are 35.14% at 250,000km. In a less good case, such as the USA, BEV CO₂ emissions still represent 44% of the ICEV.

1.8.4 SO_x ANALYSIS

The following figure shows the results in the manufacturing stag:

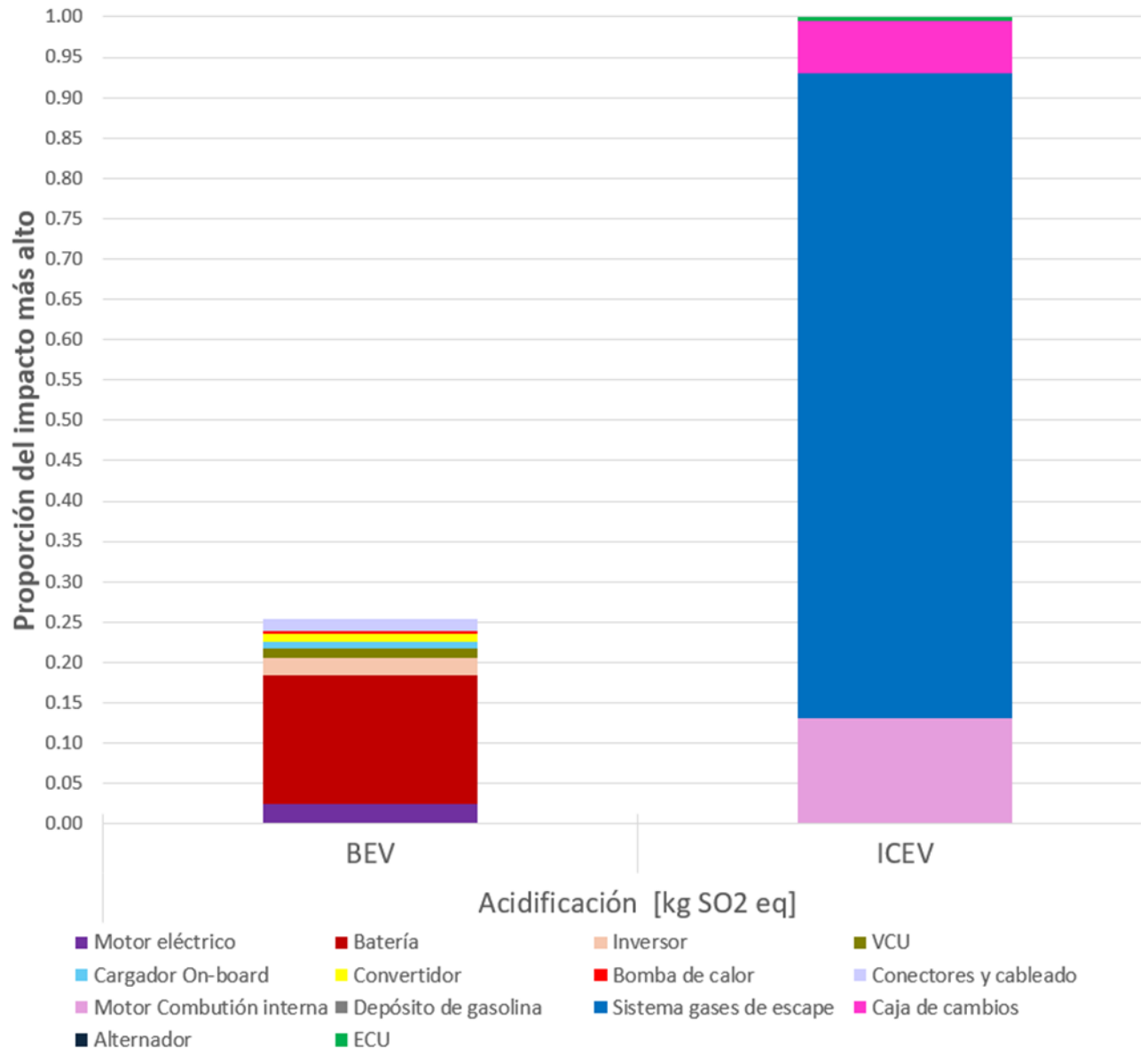


Figure 14: CO₂ emissions in the manufacturing stage

- BEV emissions represent 25% of those of the ICEV, with the main emitter being the manufacture of the battery with 16%. To a lesser extent, the electric motor and the inverter account for 2.5% each, and finally, each of the other components account for around 1%.
- In the case of the ICEV, the largest emitter is the exhaust gas system with 80%, due to the catalytic converter, which involves the extraction and refining of precious

metals such as platinum, palladium or rhodium for its manufacture, which are subsequently heated to high temperatures, which can release sulfur dioxide. In addition, a lot of energy is needed which, if it comes from burning fossil fuels, more SO₂ will be emitted during the process. NO_x analysis

1.8.4.1 Eutrophication

In the presence of sunlight and volatile organic compounds, NO_x reacts to form ozone. Although ozone in the stratosphere protects against ultraviolet radiation, at the ground level it is a harmful pollutant that can cause or aggravate respiratory problems, damage crops, etc. They also contribute to the eutrophication of water bodies.

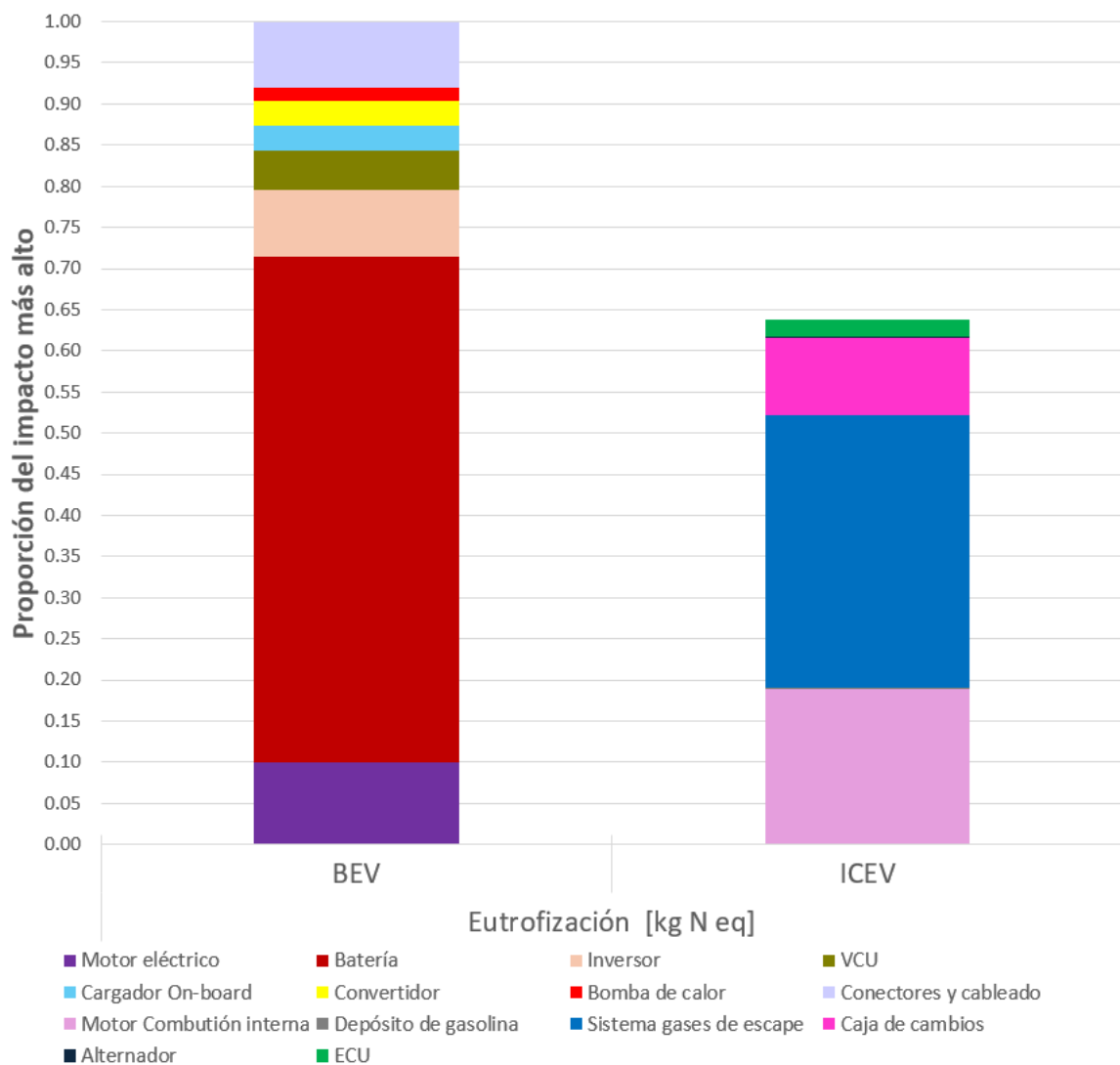


Figure 15: Eutrophication-enhancing emissions at the manufacturing stage

- The main emitter is the battery, representing 60% of the impacts, due to the processes of extraction of raw materials such as iron, phosphorus or lithium. Also due to the processing of lithium or the synthesis of phosphate compounds. The energy used is also important since the burning of fossil fuels is a major NOx emitter. To a lesser extent there is the electric motor, inverter and wiring, with 10%, 8% and 8% respectively.
- On the ICEV side, as in sulfur dioxide emission, the catalytic converter is the main emitter with 34%, followed by the internal combustion engine and gearbox, 19% and 10%.

1.8.4.2 Photochemical Oxidation ("Smog")

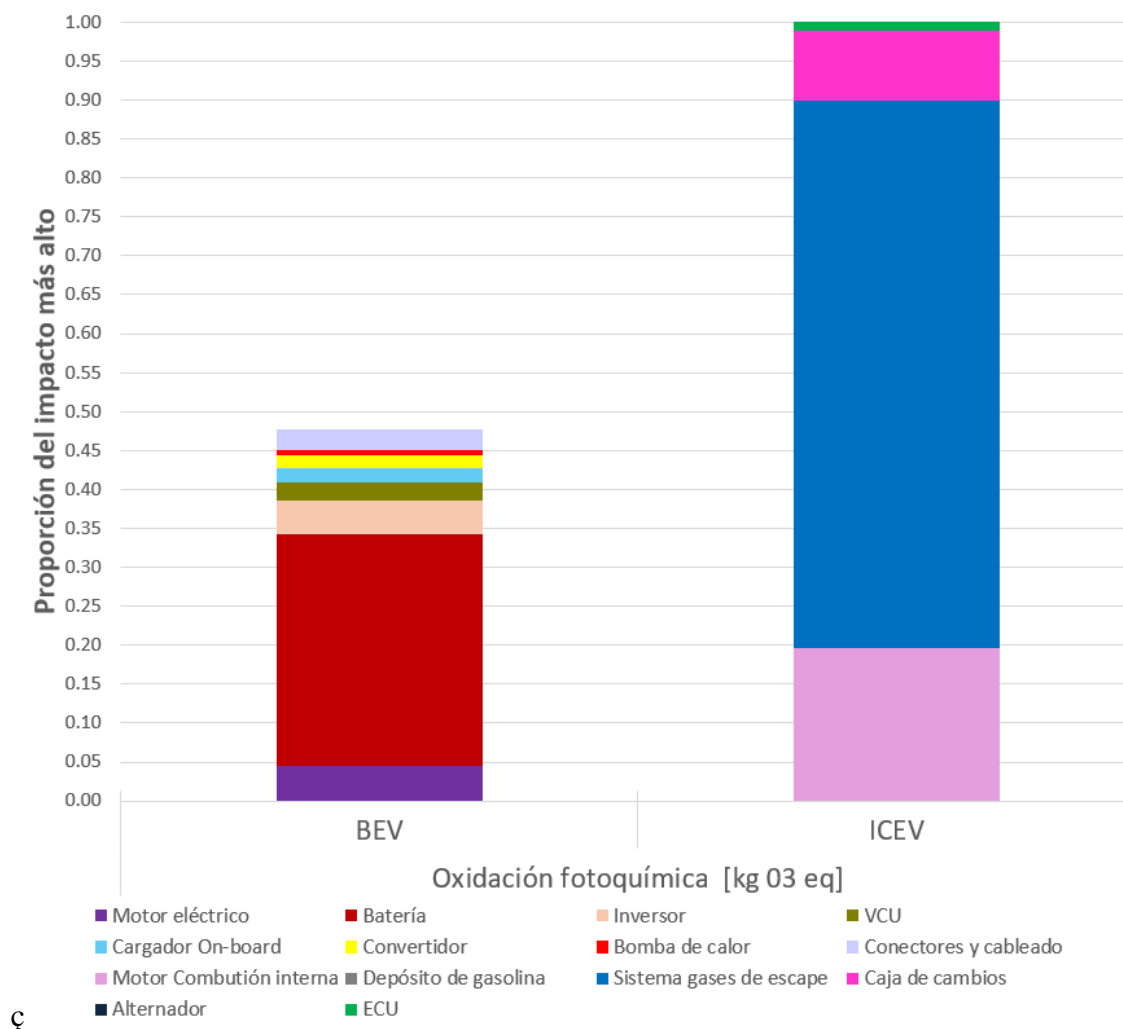


Figure 16: Smog-forming enhancing emissions at the manufacturing stage.

In this case, the ICEV has the greatest potential for smog formation, with the catalytic converter again being the main emitter, representing 70% of the total. The internal

combustion engine represents 20% and the gearbox 9%. Following the pattern of the previous BEV impacts, the battery represents the majority, around 30%, and is followed by the other components.

1.9 SENSIVITY ANALYSIS

Sensitivity analysis is essential to determine how variations in model input data affect the results obtained, thus evaluating the robustness of these results and identifying the variables that most influence environmental impacts.

Three main variations are considered in this analysis: the BEV energy consumption, measured in kWh/100 km, to analyze how energy efficiency affects environmental impacts; the change in ICEV fuel consumption, evaluated in L/100km, to understand the influence of engine efficiency and driving practices; and the variation in the percentage of renewable energy used in charging, highlighting how the source of electricity can significantly alter the LCA results.

See the results in the graphs in section 6.4 Sensitivity analysis.

1.10 CONCLUSION

To conclude the project, we will summarize the key points based on the results obtained:

- Overall, BEV presents lower impacts in most of the categories evaluated, particularly in global warming potential, ozone depletion and resource depletion, showing only 30%, 45% and 18% of the impacts compared to ICEV, respectively.
- BEV production has a considerably higher impact in categories such as eutrophication, non-carcinogenic and ecotoxicity, mainly due to battery manufacturing. However, at the use and end-of-life stage, considering its recycling or second use, the BEV tends to be more environmentally friendly.

- In terms of CO₂ emissions, those generated by ICEVs during the use stage are much higher than BEVs, which means that, looking at the entire life cycle and taking into account battery replacement, CO₂ emissions of BEVs in Europe are 35.14% at 250,000km. In a less good case, such as the USA, BEV CO₂ emissions still represent 44% of the ICEV.
- The results vary significantly depending on the energy mix used to operate the vehicles. In regions with a high proportion of renewable energies, the BEV has much lower environmental impacts compared to the ICEV.

Índice de la memoria

1.1	Definición de estudio.....	6
1.2	Life cycle Inventory (LCI)	7
1.3	Life Cycle Impact Assessment (LCIA)	9
1.3.1	<i>Resultados agrupados</i>	9
1.3.2	<i>Resultados desglosados</i>	11
1.3.2.1	Resultados del BEV	11
1.3.2.2	Resultados del ICEV	12
1.3.3	<i>Análisis CO₂</i>	13
1.3.3.1	Etapas de producción	13
1.3.3.2	Ciclo de vida entero.....	14
1.3.4	<i>Análisis SO_x</i>	15
1.3.4.1	Eutrofización.....	16
1.3.4.2	Oxidación fotoquímica (“Smog”)	17
1.4	Análisis de sensibilidad	18
1.5	Conclusión.....	18
Capítulo 2. Introducción		8
Capítulo 3. Descripción de las tecnologías		10
Capítulo 4. Estado de la Cuestión		16
Capítulo 5. Definición del Trabajo		19
5.1	Justificación.....	19
5.2	Objetivos	19
5.3	Metodología.....	20
5.4	Planificación.....	22
Capítulo 6. Modelo desarrollado.....		23
6.1	Definición del estudio	23
6.1.1	<i>Alcance y límites del sistema</i>	23
6.1.2	<i>Functional Unit</i>	27
6.2	LCI	27

6.2.1 Etapa de fabricación	27
6.2.1.1 BEV	27
6.2.1.1.1 Motor eléctrico AC	27
6.2.1.1.2 Batería de alta tensión	28
6.2.1.1.3 Inversor	28
6.2.1.1.4 Unidad de Control del Vehículo (VCU)	28
6.2.1.1.5 Cargador On-Board	29
6.2.1.1.6 Convertidor DC/DC	29
6.2.1.1.7 Cableado	29
6.2.1.1.8 Bomba de calor	30
6.2.1.2 ICEV	30
6.2.1.2.1 Motor de combustión interna	30
6.2.1.2.2 Sistema de gases de escape	30
6.2.1.2.3 Alternador	31
6.2.1.2.4 Caja de cambios	31
6.2.1.2.5 Unidad de Control Electrónica (ECU)	32
6.2.1.2.6 Depósito de gasolina	32
6.2.2 Etapa de uso	32
6.2.2.1 BEV	32
6.2.2.2 ICEV	35
6.2.3 Etapa de final de vida	35
6.2.3.1 BEV	37
6.2.3.2 ICEV	38
6.3 LCIA	39
6.3.1 Resultados agrupados	39
6.3.1.1 Porcentaje de renovables de Europa (Véase Mix energético EU, 2022)	39
6.3.1.2 Porcentaje de renovables de USA (Véase Mix energético USA, 2023)	41
6.3.2 Resultados desglosados	42
6.3.2.1 Resultados del BEV	43
6.3.2.2 Resultados del ICEV	45
6.3.3 Comparativa emisiones de CO ₂	47
6.3.3.1 Etapa de producción y final de vida	47
6.3.3.2 Etapa de uso	49
6.3.3.3 Ciclo de vida entero	50
6.3.4 Comparativa emisiones SO _x	51

6.3.5 Comparativa emisiones NO_x	54
6.3.5.1 Eutrofización.....	55
6.3.5.2 Oxidación fotoquímica (“Smog”).....	56
6.4 Análisis de sensibilidad.....	58
6.4.1 Consumo kWh/100 km.....	58
6.4.1.1 Porcentaje de renovables de Europa (Véase Mix energético EU, 2022).....	59
6.4.1.2 Porcentaje de renovables de USA (Véase Mix energético USA, 2023).....	60
6.4.2 Consumo L/100 km.....	61
6.4.3 Porcentaje de renovables.....	62
6.5 S-LCIA.....	65
6.6 Conclusión.....	67
Capítulo 7. Bibliography.....	69
ANEXO I 75	
Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	75
ANEXO II 77	

Índice de figuras

Figura 1: Alcance sistema.....	6
Figura 2: Impactos BEV vs ICEV con un 38,39% de renovables	9
Figura 3: Resultados ICEV vs BEV desglosando los componentes.....	11
Figura 4: Emisiones de CO ₂ con cambio de batería	13
Figura 5: Emisiones de CO ₂ en el ciclo de vida entero	14
Figura 6: Emisiones de SO ₂ en la etapa de fabricación.....	15
Figura 7: Emisiones potenciadoras de Eutrofización en la etapa de fabricación	16
Figura 8: Emisiones potenciadoras de formación de Smog en la etapa de fabricación.....	17
Figura 9: Proceso de Acidificación [1].....	10
Figura 10: Ecotoxicidad [2].....	11
Figura 11: Crecimiento excesivo de algas y plantas debido a la eutrofización [3]	12
Figura 12: Calentamiento global	12
Figura 13: Carcinogénicos y sus efectos [4].....	13
Figura 14: Agotamiento de la capa de ozono [5].....	14
Figura 15: Formación creada por la oxidación fotoquímica [6].....	15
Figura 16: Emisiones de CO ₂ en función de los km conducidos [11]	17
Figura 17: Estructura de un LCA	20
Figura 18: Diferentes alcances [13].....	23
Figura 19: Diagrama de flujo de procesos de BEV [14]	25
Figura 20: Componentes BEV [15].....	25
Figura 21: Componentes principales ICEV [16]	26
Figura 22: Consumos homologados WLTP [29].....	33
Figura 23: Datos relativos de reciclaje de vehículos en 2019 [33].....	37
Figura 24: Impactos BEV vs ICEV con un 38,39% de renovables	39
Figura 25: Resultados ICEV vs BEV con un 21.4% de renovables	41
Figura 20: Resultados ICEV vs BEV desglosando los componentes.....	43
Figura 27: Emisiones de CO ₂ en la producción y final de vida.....	47
Figura 28: Emisiones de CO ₂ con cambio de batería	48

Figura 29: Emisiones de CO ₂ durante la etapa de uso	49
Figura 30: Emisiones de CO ₂ en el ciclo de vida entero	50
Figura 31: Emisiones de SO ₂ en la etapa de fabricación.....	52
Figura 32: Emisiones de SO ₂ en la etapa de uso	53
Figura 33: Emisiones potenciadoras de Eutrofización en la etapa de fabricación	55
Figura 34: Emisiones potenciadoras de formación de Smog en la etapa de fabricación....	56
Figura 35: Análisis de sensibilidad en el consumo del BEV con un 38,39% de renovables	59
Figura 36: Análisis de sensibilidad en el consumo del BEV con un 21.4% de renovables	60
Figura 31: Análisis de sensibilidad del consumo del ICEV	61
Figura 38: Cuota de las energías renovables en el mix energético mundial [42].....	62
Figura 39: Distribución de la generación eléctrica de Noruega en 2022 [43].....	63
Figura 40: Análisis de sensibilidad del porcentaje de renovables	64

Índice de tablas

Tabla 1: Componentes característicos de ambas tecnologías	7
Tabla 2: Mix energético USA, 2023.....	8
Tabla 3: Mix energético EU, 2022	8
Tabla 4: Tecnología que tiene mayores impactos según categorías	10
Tabla 2: Componentes característicos de ambas tecnologías	26
Tabla 3: Mix energético USA, 2023.....	34
Tabla 4: Mix energético EU, 2022	34
Tabla 5: Tecnología que tiene mayores impactos según categorías	40
Tabla 6: Impactos sociales.....	65
Tabla 7: Marco de las categorías del S-LCIA [45].....	77
Tabla 8: Subcategorías del S-LCIA [45]	78

Índice de abreviaciones¹

LCI	Life Cycle Inventory	GHG	Greenhouse-gas
BMS	Battery Management System	LFP	Lithium Iron Phosphate (LiFePO ₄)
KWh	Kilowatt-hour, 1 kWh = 3.6 MJ	GWP	Global Warming Potential
EoL	End-of-life	HTP	Human Toxicity Potential, cancer
BEV	Battery Electric Vehicle	ISO	International Organization for Standardization
FDP	Fossil Depletion Potential	LCA	Life Cycle Assessment
FEP	Freshwater Eutrophication Potential	LMO	Lithium Manganese Oxide (LiMn ₂ O ₄)
FETP	Freshwater Ecotoxicity Potential	LIB	Lithium-ion Battery

¹ Las abreviaciones están en inglés debido al uso en su contexto

Capítulo 2. INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años, la situación medioambiental se ha visto afectada por la globalización y el aumento de la población, lo cual ha propiciado un incremento de la contaminación mundial. La Unión Europea está llevando a cabo una legislación cuyo objetivo es reducir las emisiones de CO₂, impulsando la implantación de vehículos eléctricos.

Por esta razón, el transporte se está viendo afectado y la movilidad eléctrica se ha ido abriendo hueco en el mundo de la automoción, siendo más habitual encontrarnos circulando a estos automóviles. Con esta transformación del mercado del automóvil, se va a llevar a cabo una evaluación de los impactos en el ciclo de vida (LCA)² de las dos dominantes tecnologías actuales en el mercado.

Por una parte, el gran conocido vehículo propulsado por un motor de combustión interna, que lleva mejorando a lo largo de más de un siglo. Con el paso de los años ha tenido que hacer frente a las nuevas normativas establecidas por la unión europea y las diferentes entidades geopolíticas.

Por otra parte, el vehículo propulsado por energía eléctrica que estaba abriéndose paso en las últimas décadas en países como China y, especialmente, estos últimos años en el resto de los países gracias al avance de las tecnologías. Además, las restricciones que se comentaban junto con las ayudas ofrecidas por los gobiernos están haciendo que el avance se produzca a mayor velocidad.

Para llevar a cabo el LCA, se va a estudiar el ciclo de vida completo de ambas tecnologías de principio a fin, lo que se conoce como un estudio Well-to-Wheel (WTW) o Cradle-to-

² Life Cycle Assessment

Grave. Para ello, se evaluará y comparará la huella medioambiental completa de ambas tecnologías. Desde la extracción de materias primas, la producción y el uso del producto, hasta el final de su vida útil.

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Al tratarse de un LCA se debe explicar qué impactos medioambientales se van a tratar. En este caso se usará el programa OpenLCA con la herramienta LCIA TRACI 2.1. Con esta herramienta los impactos son los siguientes:

Acidificación

Se refiere al proceso de reducción del nivel de pH en el medio ambiente, centrándose en el océano. La combustión de combustibles fósiles y la deforestación son actualmente los principales responsables de este fenómeno. La unidad de medida utilizada es *kg SO₂ eq* por kg de sustancia analizada, y las emisiones primarias consisten en CO₂, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre.

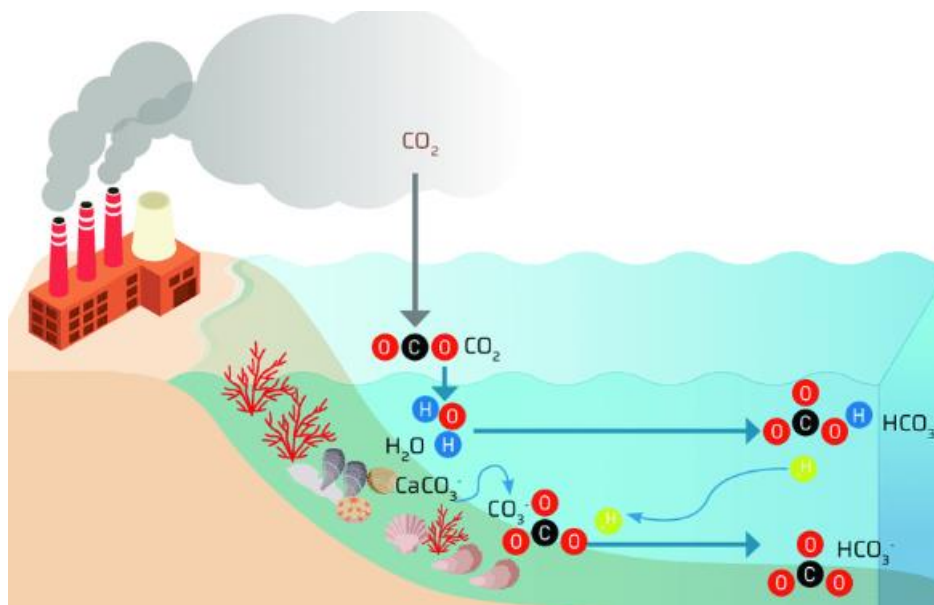


Figura 17: Proceso de Acidificación [1]

Ecotoxicidad

Es una medida relativa de la muerte de organismos causada por sustancias químicas presentes en el medio ambiente. Los principales responsables son los procesos de fabricación de productos plásticos, la producción de automóviles, la industria minera, la fabricación de productos electrónicos y el reciclaje. La unidad TRACI en este caso es CTUe³ que estima el aumento de la muerte de ecosistemas por kilogramo de material liberado. Las emisiones primarias incluyen productos farmacéuticos, metales, aceites y pesticidas.

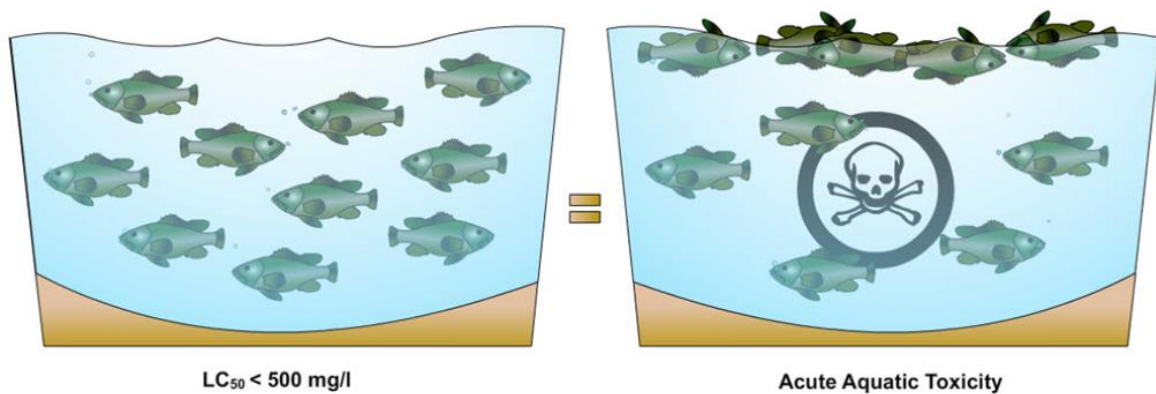


Figura 18: Ecotoxicidad [2]

Eutrofización

La eutrofización es el proceso de enriquecimiento de los ecosistemas acuáticos con nutrientes que provoca el crecimiento de algas. Los principales factores que contribuyen a este fenómeno son las prácticas agrícolas intensivas, las actividades industriales y el crecimiento demográfico. Las unidades indicadas son **kg N eq** por kg de sustancia analizada, con emisiones primarias de óxidos de nitrógeno, dióxidos de nitrógeno, fosfatos y amoníaco.

³ Comparative Toxic Units for freshwater ecosystems



Figura 19: Crecimiento excesivo de algas y plantas debido a la eutrofización [3]

Potencial de calentamiento global

El GWP es una medida relativa de la cantidad de calor que un gas de efecto invernadero retiene en la atmósfera. Los principales contribuyentes son la combustión de combustibles fósiles, la agricultura y los cambios en el uso del suelo. Se mide en **kg CO₂ eq**, y las emisiones primarias incluyen metano, óxido nitroso, HFC, CO₂ y PCF.

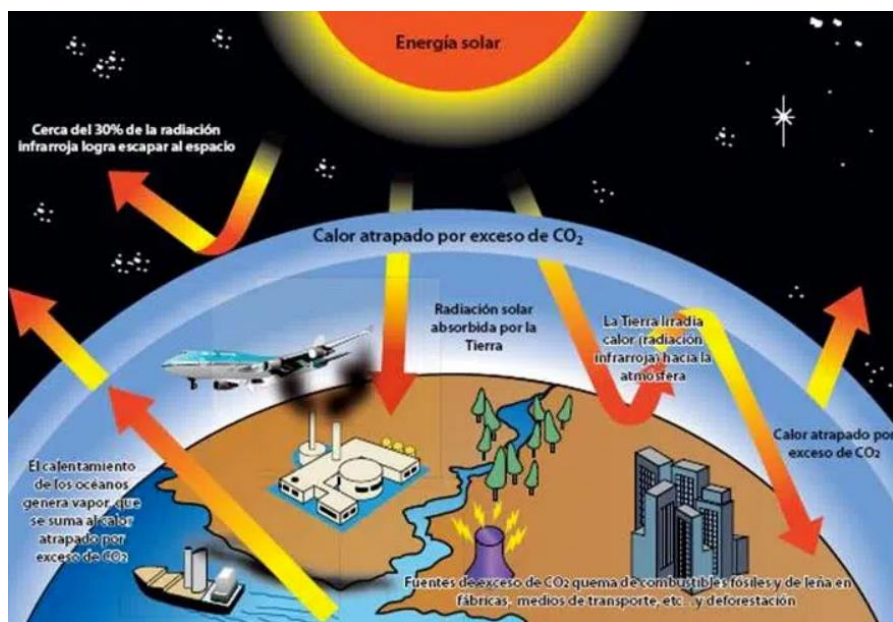


Figura 20: Calentamiento global

Efectos respiratorios

Es una medida de los riesgos causados por las partículas del aire, como las afecciones respiratorias. Los principales contribuyentes son los sectores donde se produce una combustión. La unidad utilizada es **Kg PM2.5 eq** por kg sustancia. Las principales emisiones son el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno.

Carcinogénicos

Se refiere a una métrica utilizada para medir y cuantificar el impacto potencial de sustancias carcinogénicas en la salud humana. Se mide en **CTUh⁴**, se utiliza para estimar el aumento potencial del riesgo de cáncer por kilogramo de una sustancia liberada al medio ambiente. Ayuda a comparar el potencial carcinogénico de diferentes sustancias y procesos basados en sus emisiones.

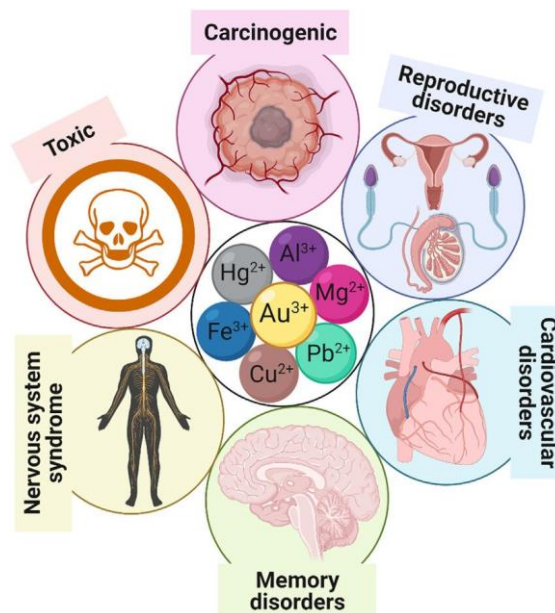


Figura 21: Carcinogénicos y sus efectos [4]

⁴ Comparative Toxic Units for humans

No carcinogénicos

También son significativos los efectos derivados de la inhalación del aire, ingestión de alimentos o agua y absorción cutánea. Las refinерías de petróleo, la producción de electricidad a partir del carbón, la industria química y la fabricación básica de hierro y acero son las principales fuentes de estos efectos. Las emisiones primarias consisten en polvo de sílice, otros componentes minerales de la arena de fundición y aditivos de la pintura de los buques, medidos en **CTUh** por kg.

Agotamiento de la capa de ozono

Se produce cuando los átomos de cloro y bromo destruyen la capa de ozono de la estratosfera, lo que reduce la protección frente a la radiación solar, especialmente los rayos UV, y aumenta el riesgo de cáncer de piel. Las principales fuentes de sustancias que agotan la capa de ozono son los refrigerantes y los propelentes. Se expresa en **kg de CFC-11 eq** por kg de la sustancia. Las emisiones primarias comprenden los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbónoses (HCFC).



Figura 22: Agotamiento de la capa de ozono [5]

Oxidación fotoquímica

Es una reacción que se produce entre las emisiones de los combustibles fósiles y la luz solar, que tiene lugar en la troposfera. Las principales fuentes de estas emisiones son la combustión de combustibles fósiles, las centrales eléctricas de carbón y las plantas de fabricación de productos químicos. Se mide en **kg O₃ eq** por kilogramo de sustancia analizada. Las principales emisiones son los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre y el monóxido de carbono.



Figura 23: Formación creada por la oxidación fotoquímica [6]

Agotamiento de los recursos

Los recursos no renovables empiezan a escasear porque se consumen a un ritmo superior al de su reposición. Los principales responsables de este problema son el consumo de recursos como metales, minerales o madera, así como industrias como la minería, del petróleo, del gas y la explotación forestal. Se mide con el excedente de MJ y representa el consumo energético de los combustibles fósiles. Las principales emisiones proceden del petróleo y el carbón utilizados en la producción de energía.

Capítulo 4. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El análisis del ciclo de vida ofrece un marco sólido para evaluar el impacto ambiental de los BEV y los ICEV. En este apartado se va a realizar un análisis de los estudios y artículos que se han llevado a cabo, con el objetivo de ver a qué conclusiones se han llegado.

Los estudios subrayan que la producción de BEV es intensa en recursos y energía, en particular el proceso de fabricación de baterías. Un estudio [7] destaca la importante huella medioambiental asociada a la extracción de materiales críticos como el litio, el cobalto y el níquel, esenciales para las baterías de iones de litio. Estos hallazgos se alinean con otros estudios, que apuntan a la criticidad del abastecimiento de materiales sostenibles y eficiencias de fabricación para mitigar los impactos ambientales de los BEV

Durante la fase de uso, los BEV no emiten gases de escape, lo que supone un marcado contraste con los ICEV. Sin embargo, la ventaja medioambiental de los BEV depende en gran medida del mix de generación eléctrica. Los estudios sugieren que en las regiones con un alto porcentaje de energías renovables en el mix eléctrico, los BEV tienen un impacto medioambiental sustancialmente menor en comparación con los ICEV [8]. Esta dependencia denota la importancia de la transición a fuentes de energía más limpias para maximizar los beneficios ambientales de los BEV

El tratamiento al final de la vida útil de los BEV emerge como un factor vital en su perfil medioambiental. Unos procesos de reciclaje eficaces pueden aliviar la demanda de extracción de material virgen y reducir la carga medioambiental global [9]. Por ello, se hace hincapié en ampliar el ciclo de vida de las baterías a través de aplicaciones de segunda vida, contribuyendo aún más a su ventaja ambiental sobre los ICEV.

Un estudio de caso centrado en Hong Kong [10] proporciona una visión de cómo los factores regionales influyen en los resultados del ciclo de vida. El estudio destaca el papel de la futura combinación energética de Hong Kong a la hora de determinar la viabilidad medioambiental de los BEV, sugiriendo que un cambio hacia fuentes de energía más limpias podría mejorar significativamente sus beneficios relativos. Este estudio ejemplifica la importancia de contextualizar los resultados del estudio dentro de paisajes energéticos regionales específicos.

En un LCA realizado por Scania, se concluye que los vehículos eléctricos presentan una ventaja ambiental significativa durante la fase de uso en comparación con los vehículos diésel, especialmente en términos de emisiones reducidas y menor impacto ambiental general. Sin embargo, esta ventaja está condicionada por la fuente de electricidad utilizada para cargar los vehículos. En regiones donde la generación de electricidad es más limpia, los beneficios ambientales de los vehículos de distribución eléctrica son más destacados.

En la siguiente gráfica, se aprecia como a partir del kilómetro 33000 o 68000 el vehículo diésel empieza a tener mayores emisiones de dióxido de carbono.

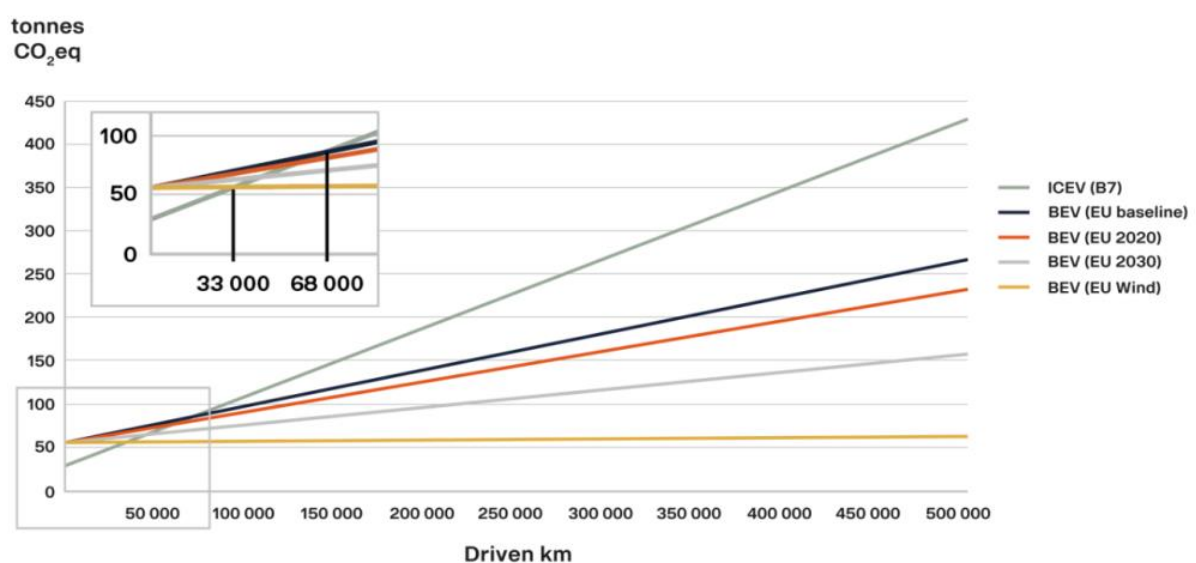


Figura 24: Emisiones de CO2 en función de los km conducidos [11]

Por lo que, sintetizando los resultados de los artículos revisados, es evidente que, aunque los BEV tienen potencial para reducir las emisiones del ciclo de vida, su rendimiento medioambiental está intrínsecamente ligado a la combinación de energías, los avances en la tecnología de las baterías y las prácticas de gestión del final de la vida útil.

Capítulo 5. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

5.1 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto nace fruto de la situación actual en la que se está imponiendo el uso del vehículo eléctrico a los ciudadanos con el argumento del daño al planeta que causan los vehículos de combustión interna. Así pues, se ha considerado necesario hacer un estudio en profundidad de la huella medioambiental que tienen asociadas ambas tecnologías. Con este proyecto se podrá evaluar de forma crítica y desde una perspectiva técnica si el cambio que se está produciendo en el mundo del automóvil es justificado con las emisiones generadas por las tecnologías presentes.

5.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es realizar una comparativa del ciclo de vida del vehículo eléctrico frente al de combustión interna y obtener una conclusión que demuestre de manera cuantitativa, con coherencia y objetividad qué tecnología es más amigable con el medio ambiente.

A lo largo del proyecto se cumplirán los siguientes objetivos:

- Realizar el estudio de inicio a fin, teniendo en cuenta la extracción de las materias primas, la producción de los componentes, la etapa de uso y, finalmente, la de final de vida.
- Para que un LCA se lleve a cabo con éxito es muy importante la obtención de datos fiables, por lo que se deberá evaluar con detalle la procedencia de estos para ser usados.
- Se realizará un análisis de sensibilidad de parámetros clave para ver el impacto que tienen en el estudio.

5.3 METODOLOGÍA

La metodología usada será la propia de un LCA, la cual es una herramienta para evaluar de manera cuantitativa el impacto medioambiental de un producto, proceso o actividad. Para llevar a cabo este estudio se ha de seguir los estándares ISO, concretamente ISO 14040, los cuales definen de manera general un LCA y los ISO 14044:2006 [12], que establece instrucciones y métodos específicos. Se utilizará el programa OpenLCA con las bases de datos pertinentes.

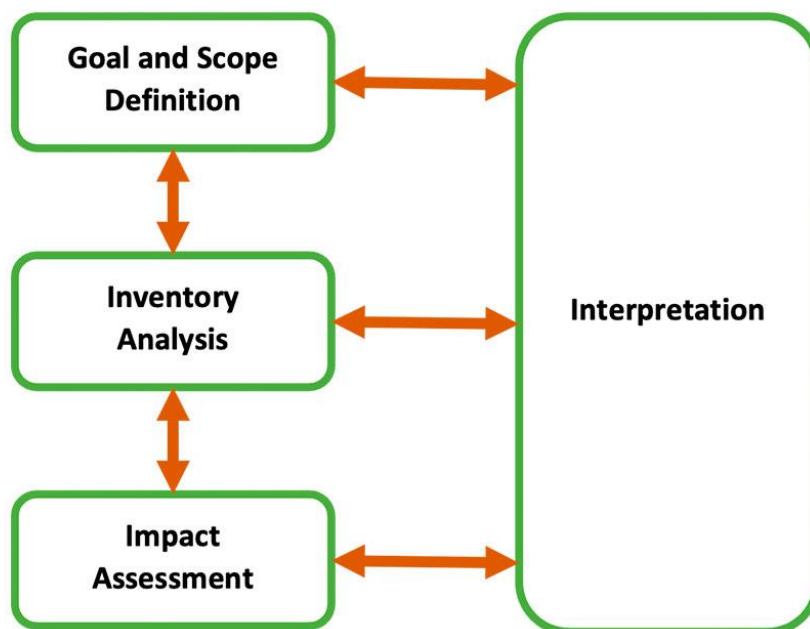


Figura 25: Estructura de un LCA

En primer lugar, se habrá de definir la profundidad del estudio, estableciendo el sistema con sus límites. Es importante a su vez establecer una unidad funcional, para poder comparar todas las categorías de impactos medioambientales del LCA en función de esta unidad.

El segundo paso del LCA es el LCI (Life Cycle Inventory) donde se realizará el estudio y recolección de los datos e información necesarios para completar posteriormente la evaluación de los impactos.

El tercer paso es el LCIA (Life Cycle Impact Assessment), en el cual se evaluarán la suma de los impactos de todas las etapas del diagrama de procesos dentro de las barreras del sistema definido.

Tras el LCIA, se llevará a cabo un Análisis de Sensibilidad de los parámetros más importantes del LCI con el que se podrá analizar en qué medida su variación afecta al sistema.

Finalmente se hará un S-LCA (Social Life Cycle Assessment), el cual es un método usado para la evaluación de los aspectos sociales y sociológicos causados por estas tecnologías que se están estudiando.

5.4 PLANIFICACIÓN

Nombre de la tarea	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Estado	16.01.2024	23.01.2024	30.01.2024	06.02.2024	13.02.2024	20.02.2024	27.02.2024	05.03.2024	12.03.2024	19.03.2024	26.03.2024	02.04.2024	09.04.2024	16.04.2024	23.04.2024	30.04.2024	07.05.2024	14.05.2024	21.05.2024	
				Alcance, límites del sistema/estudio, objetivos y funcional unit	16.01.2024	22.01.2024	Terminado	█															
Busqueda de datos de ambas tecnologías (LCI) (EIO-LCA?)	23.01.2024	05.02.2024	Terminado		█	█																	
Allocation cuando se considere necesario			Cerrado																				
Creación de los procesos (LCIA)	06.02.2024	29.04.2024	Cerrado				█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█				
<i>Materias primas EV</i>	06.02.2024	12.02.2024	Terminado				█																
<i>Materias primas ICEV</i>	13.02.2024	19.02.2024	Terminado					█															
<i>Etapas de fabricación componentes EV (batería, inversor, motor, cargador On-board,...)</i>	20.02.2024	04.03.2024	Terminado					█	█														
<i>Etapas de fabricación componentes ICEV (Motor, sistema de escape, alternador, centralita del motor (ECU), caja de cambios,...)</i>	19.03.2024	01.04.2024	Terminado									█	█										
Uso EV	02.04.2024	08.04.2024	Terminado											█									
Uso ICEV	09.04.2024	15.04.2024	Terminado												█								
<i>End-of-Life EV</i>	15.04.2024	22.04.2024	En progreso													█							
<i>End-of-Life ICEV</i>	23.04.2024	29.04.2024	En progreso														█						
Análisis de sensibilidad	10.05.2024	17.05.2024	Cerrado																			█	
Impactos sociales (S-LCA)	18.05.2024	25.05.2024	Cerrado																				█

Capítulo 6. MODELO DESARROLLADO

6.1 DEFINICIÓN DEL ESTUDIO

Como se ha mencionado en el apartado 5.3, según la ISO 14044:2006, el primer paso es la definición del alcance, los objetivos y los límites de estudio, gracias a los cuales se toman las decisiones sobre los detalles del sistema. Todo esto debe ser definido antes de reunir cualquier tipo de datos o información. Además, podría modificarse durante el transcurso, a medida que nueva información encontrase.

6.1.1 ALCANCE Y LÍMITES DEL SISTEMA

A continuación, se presentan los distintos tipos de estudio dentro del ciclo de vida de diferentes productos en función de la profundidad y extensión deseada:

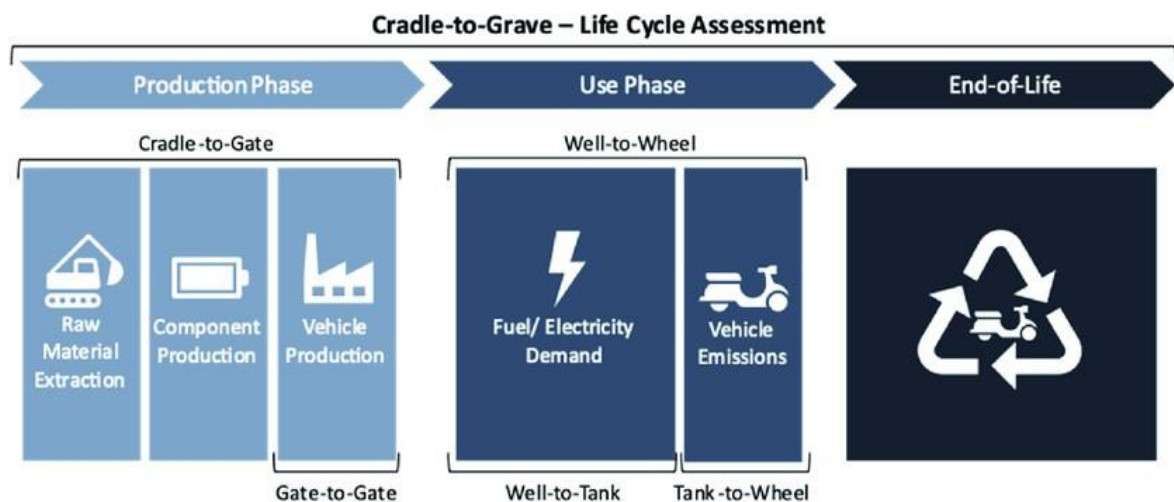


Figura 26: Diferentes alcances [13]

Como se aprecia en la figura anterior, hay diferentes terminologías de estudio según la parte del proceso que sea. En este proyecto se va a realizar un estudio completo de inicio a fin de

ambas tecnologías, lo que se conoce como “Cradle-to-Grave”. Lo cual engloba las siguientes etapas:

- La fase de producción, que está constituida por la extracción de materias primas, producción de los componentes y el ensamblaje del vehículo, conocido como “Cradle-to-Gate”.
- La fase de uso, en primer lugar, lo que se conoce como “Well-to-Tank”, que es la obtención del combustible en el caso del ICEV⁵ y la obtención de la electricidad en el del BEV⁶. En segundo lugar, las emisiones causadas por ambas tecnologías por el propio uso, denominado como “Tank-to-wheel”. La fase completa se denomina “Well-to-Wheel”.
- Finalmente, se estudiará la fase de final de vida ya sea vertido de residuos o reciclaje y segundo uso.

Visto el alcance de este proyecto, se ha de definir los límites del sistema que se va a estudiar. Para ello, se van a tener en cuenta los componentes diferenciadores de ambas tecnologías y no aquellos que tengan en común. En el caso del BEV, se tiene el siguiente diagrama:

⁵ Internal Combustion Engine Vehicle

⁶ Battery Electric Vehicle

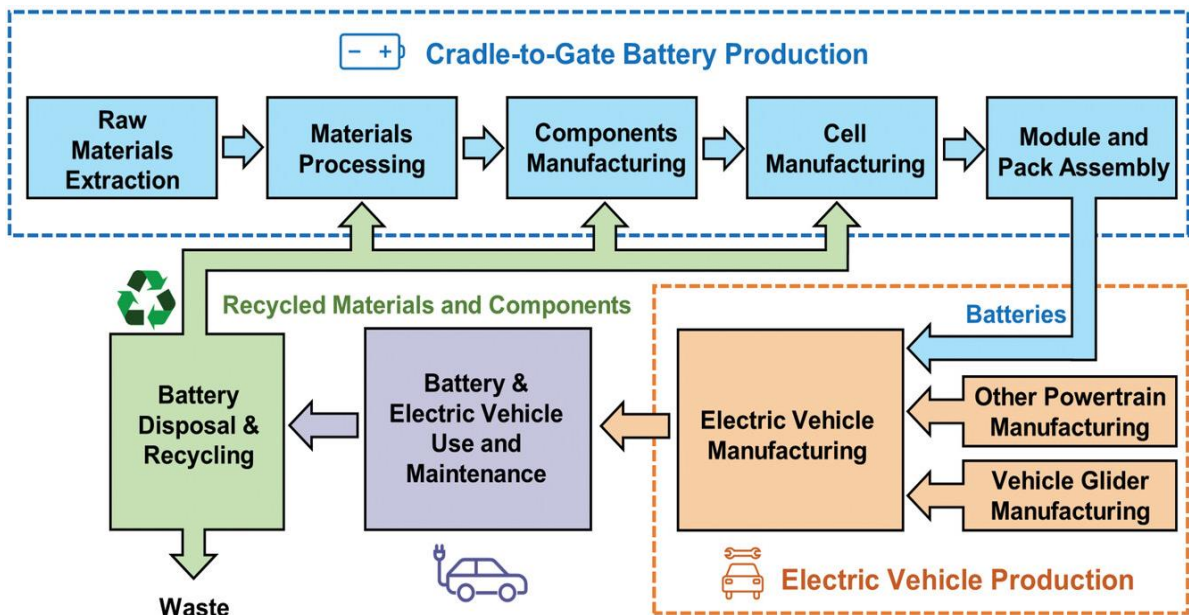


Figura 27: Diagrama de flujo de procesos de BEV [14]

Además, en la etapa de producción se analizarán los siguientes elementos:

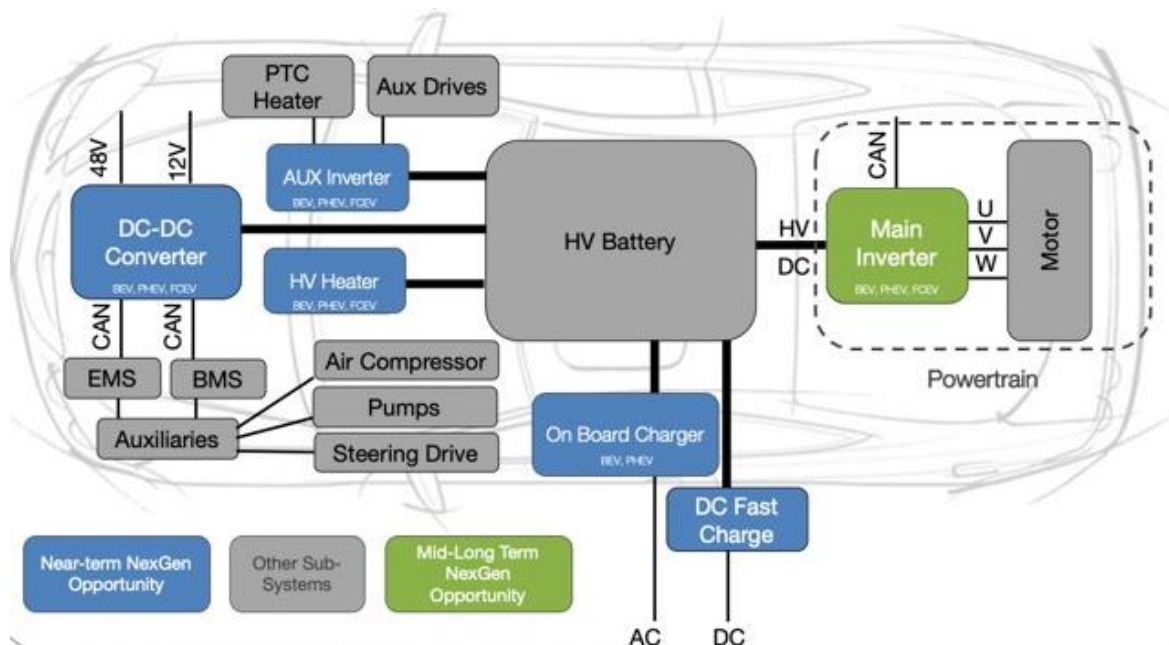


Figura 28: Componentes BEV [15]

En cuanto al diagrama de flujo de procesos del ICEV, es similar al del BEV teniendo en cuenta sus componentes, en la siguiente figura se muestran los más característicos:

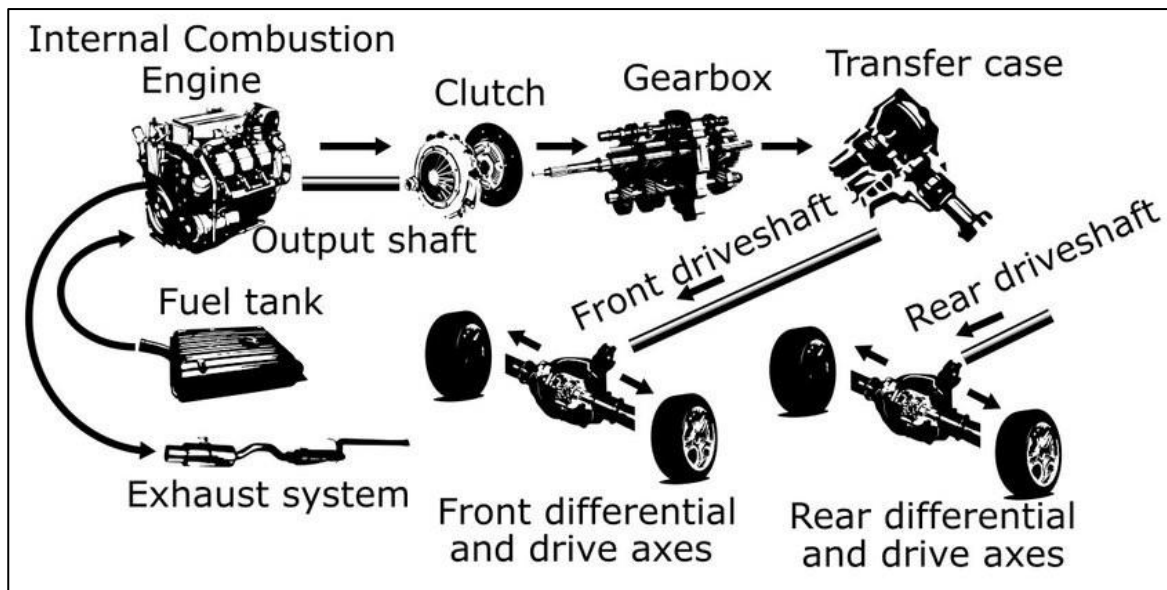


Figura 29: Componentes principales ICEV [16]

Para definir los límites del sistema de estudio con exactitud se presenta la siguiente tabla con los componentes que se van a comparar:

Tabla 9: Componentes característicos de ambas tecnologías

Componentes BEV	Componentes ICEV
Motor eléctrico AC	Motor de combustión interna (Gasolina)
Batería de alta tensión	Depósito de gasolina
Inversor (DC/AC) y VCU (Vehicle Control Unit)	Sistema de gases de escape
Cargador On-board	Transmisión
Convertidor DC/DC	Alternador
BMS (Battery management system)	ECU (Electronic Control Unit)
Bomba de calor (calefacción)	
Conectores y cableado del sistema eléctrico	

Como se ha dicho inicialmente, los componentes que se van a estudiar son aquellos que son diferentes en ambas tecnologías, dejando fuera de del sistema aquellos que tienen en común y que son propios de todos los vehículos.

En cuanto a durabilidad en kilómetros, se ha intentado buscar información precisa de cuánto es la vida útil de ambas tecnologías. Sin embargo, no hay información exacta, ya que dependiendo de la ubicación estos datos varían. Según un estudio del departamento de acción climática de la Unión Europea [17], el kilometraje medio de un vehículo diésel es de 208 000 km, frente a 160 000 km de uno de gasolina. Por otro lado, los vehículos ligeros de uso comercial, como furgonetas, es de 224 000 km. Sin embargo, en Estado Unidos, los coches de gasolina tienen una media de 160 000 millas, es decir, unos 256 000 km. [18]

Por ello, inicialmente se va a realizar el LCA para una vida media de 250.000 km. Más adelante, en el análisis de sensibilidad se variará esta cifra para analizar los resultados.

6.1.2 FUNCTIONAL UNIT

La unidad funcional representa una medida cuantificable del rendimiento y la función de un producto o servicio. El propósito de definir una unidad funcional es proporcionar una base clara para comparar los impactos ambientales de diferentes alternativas. En este proyecto la unidad funcional será “1 km conducido”

6.2 LCI

Para llevar a cabo la búsqueda de información de todos los elementos mencionados anteriormente, el estudio va a intentar centrarse en coches de estilo compacto o sedan, ya que son los que predominan en la lista de los 10 coches más vendidos en 2022 [19].

6.2.1 ETAPA DE FABRICACIÓN

6.2.1.1 BEV

6.2.1.1.1 Motor eléctrico AC

El motor eléctrico más utilizado en los vehículos eléctricos actuales es de corriente alterna, por lo que en este estudio se va a utilizar un motor AC, fabricado por la empresa suiza, Brusa. Tiene una potencia máxima de 100 kW y un peso de 53 kg. Los datos se han obtenido de la

base de datos Ecoinvent 3.7 [20]. En esta operación se han tenido en cuenta la extracción de las materias primas, la recepción de estas mismas, así como la energía y los esfuerzos necesarios para la fabricación de este componente. El resultado es el motor totalmente fabricado.

6.2.1.1.2 Batería de alta tensión

La batería de iones de litio representa uno de los componentes más críticos en la configuración de un vehículo eléctrico, proporcionando la energía necesaria para su propulsión. Así pues, los datos de un pack de baterías se han obtenido a través de [20] mediante el proceso de la fabricación un módulo de 48V y 2,1 kWh, compuesto por 14 celdas prismáticas de iones de litio. En este proceso se ha tenido en cuenta la producción de las 14 celdas, de la envolvente de acero, del BMS (Battery Management System) y de los cables. En ello también se engloba la energía y el transporte necesario. Los impactos se calcularán para una batería de 50 kWh, que es la media en vehículos eléctricos compactos.

6.2.1.1.3 Inversor

El inversor es un componente clave en la electrónica de potencia de un vehículo eléctrico, convirtiendo la corriente continua (DC) de la batería en corriente alterna (AC) para alimentar el motor eléctrico. Este análisis se centra en un inversor basado en información directa del fabricante suizo Brusa [20]. Los datos se presentan en función del peso del dispositivo, siendo el inversor de 9,5 kg, adecuado para un motor eléctrico de 100 kW. El proceso comienza con la extracción de los materiales, los esfuerzos necesarios para la producción de los componentes, así como el ensamblaje. La actividad culmina con el inversor completamente ensamblado.

6.2.1.1.4 Unidad de Control del Vehículo (VCU)

La Unidad de Control del Vehículo (VCU) juega un papel crucial en la gestión de la electrónica de potencia en el powertrain de un vehículo eléctrico, supervisando y controlando la distribución de energía entre los diversos componentes electrónicos, como el inversor y la

batería. La información también se ha obtenido de manera directa del fabricante suizo Brusa [20], centrándose en una unidad de distribución de potencia específica que pesa 3,9 kg.

6.2.1.1.5 Cargador On-Board

Para garantizar la eficacia de la recarga de baterías se incorpora un sistema de carga se ha de implementar un cargador en el vehículo eléctrico. De la misma manera, los datos son proporcionados por Brusa, centrado en un modelo de cargador que tiene un peso de 6,2 kg. Al igual que en los componentes anteriores, se tiene en cuenta la fabricación de los componentes, el ensamblaje y, el transporte y distribución.

6.2.1.1.6 Convertidor DC/DC

El convertidor realiza la conversión de voltaje de DC a DC para alimentar diversos sistemas electrónicos del vehículo desde la batería principal. El modelo estudiado tiene un peso de 4,5 kg y, se ha obtenido mediante Brusa. El estudio de la producción engloba las etapas anteriores.

6.2.1.1.7 Cableado

En cuanto al cableado, se va a tener en cuenta el cableado propio del powertrain eléctrico y no el común en ambos vehículos. En ese caso, el cableado engloba a los cables de potencia que van de la batería al inversor, del inversor al motor y del cargador a la batería. Sin embargo, los cables del BMS ya se han tenido en cuenta en la producción de la batería.

La información de estos cables se ha obtenido de la base de datos [20] y el resultado está dado por kg de cable. Por lo que un vehículo compacto tiene entre 20 y 25 metros de cable de potencia, de entre 50 y 95 mm² [21]. Utilizando valores medios y sabiendo que un cable de 70 mm² tiene un peso de 85,2 kg/100m [22], se obtiene que, para una distancia de 22,5m el peso es de 19,17 kg.

6.2.1.1.8 Bomba de calor

En los vehículos eléctricos el sistema de aire acondicionado y calefacción hace que la autonomía se vea mermada, especialmente la calefacción en invierno. Es por ello por lo que desde hace unos años están implementando el uso de una bomba de calor. Este dispositivo puede actuar de aire acondicionado o de calefacción con un consumo mucho menor que con sistemas tradicionales de resistencia.

Un vehículo compacto necesita una bomba de calor con una potencia entre 2 y 4 kW [23]. La obtención de los datos de una bomba de calor de EV ha sido complicada y poco fiable, por lo que se ha decidido utilizar el proceso de fabricación de una bomba de calor de 10kW de la base de datos [20] y calcular la parte proporcional, consiguiendo así una estimación más certera.

6.2.1.2 ICEV

6.2.1.2.1 Motor de combustión interna

El motor de combustión interna (ICE) utiliza combustibles fósiles o biocombustibles para generar la potencia necesaria para el desplazamiento del vehículo. En este estudio, nos centraremos en un ICE típico para un vehículo de pasajeros, con un peso aproximado de 275 kg. Los datos para este análisis se han derivado del " Life Cycle Inventory for the Golf A4" [24]. Este conjunto de datos incorpora tanto los materiales brutos como los insumos energéticos necesarios para el proceso de producción, incluyendo las operaciones en la planta de producción. El resultado final es el motor de combustión interna completamente ensamblado, así como las fracciones de restos resultantes del proceso de producción.

6.2.1.2.2 Sistema de gases de escape

El convertidor catalítico (catalizador) es un componente crítico en los sistemas de escape de los vehículos con motor de combustión interna, diseñado para reducir las emisiones nocivas de los gases de escape. Transforma los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos no quemados en nitrógeno (N_2), dióxido de carbono (CO_2) y vapor

de agua (H₂O), contribuyendo significativamente a la disminución del impacto ambiental de los vehículos convencionales. Se ha estudiado un catalizador de tres vías de 19,1 L [25]. Se han tenido en cuenta los materiales, el transporte, energía y agua necesarios para su producción.

6.2.1.2.3 Alternador

El alternador es el encargado de convertir la energía mecánica del motor en energía eléctrica para cargar la batería y alimentar el sistema eléctrico del vehículo mientras está en funcionamiento. Los datos para su modelado se han adquirido de un previo LCA, con un peso total de 6,069 kg [26].

6.2.1.2.4 Caja de cambios

La caja de cambios es la responsable de variar la transmisión de potencia del motor a las ruedas, permitiendo al vehículo adaptarse a diferentes velocidades y condiciones de conducción. Este análisis se enfoca en la caja de cambios fabricada con la aleación AlSi9Cu3, una elección popular. El porcentaje típicamente es un 86% al 91% de aluminio. A ella se añade silicio, en una proporción del 8.5% al 12%, para mejorar la fusibilidad y las propiedades mecánicas, y cobre, en un rango del 2% al 4%, para aumentar la resistencia y la dureza. [27]

Los datos se han obtenido de [24], donde se ha modelado una caja de cambios de 49,51 kg. En este estudio se han tenido en cuenta procesos como el pretratamiento para preparar el metal para la fundición. En las operaciones de dosificación, tratamiento metalúrgico y fundición se forma la aleación con las propiedades deseadas. La planta y el equipo requieren un mantenimiento y reparación para mantener la eficiencia operativa. Además, se estima la producción de la infraestructura necesaria para estos procesos.

6.2.1.2.5 Unidad de Control Electrónica (ECU)

La Unidad de Control Electrónico (ECU) es un componente crítico en la gestión y el rendimiento de los vehículos modernos, actuando como el cerebro del sistema electrónico del automóvil. De acuerdo con la información suministrada por la base de datos [20], la composición de la ECU típica considerada en este estudio es de un 46% de acero para la carcasa, un 32% de plásticos, un 14% de placas de circuito impreso y un 8% de cables de varios tipos. El resultado de este proceso se da por kg, por lo que se calculará para el peso medio de una ECU que son 2kg. [28]

6.2.1.2.6 Depósito de gasolina

El depósito de gasolina está diseñado para almacenar de forma segura el combustible necesario para el funcionamiento del motor. La capacidad y el diseño del depósito pueden variar significativamente dependiendo del tamaño del vehículo y los requisitos de autonomía. Como en los casos anteriores, se utilizará el tamaño del golf A4, siendo de 55L [24]. Para el cálculo se ha utilizado el proceso de fabricación de un depósito de gasolina de [20] en el que el resultado estaba dado por litros.

6.2.2 ETAPA DE USO

6.2.2.1 BEV

Para la etapa de uso del vehículo eléctrico se ha de estudiar la energía necesaria a lo largo de los 250.000 km. Para ello se presentan los siguientes consumos de coches compactos/sedanés (cercaos a la potencia de 100 kW modelada):

Modelo	Consumo
Citroën ë-C4	14,9 kWh
Volkswagen ID.3	15,2 kWh
Volkswagen ID.3	15,3 kWh
Cupra Born	15,4 kWh
Renault Mégane	15,5 kWh
Cupra Born	15,8 kWh
Renault Mégane	15,8 kWh
Renault Mégane	16,1 kWh
MG4	16,5 kWh
MG4	16,6 kWh
Nissan Leaf	16,6 kWh
MG4	17 kWh
Nissan Leaf	17,8 kWh

Figura 30: Consumos homologados WLTP [29]

Como se aprecia hay varios modelos iguales, la razón es que son distintas motorizaciones. Haciendo una media, se obtiene una media de 16,03 kWh por cada 100 km recorridos. Como se sabe, el consumo homologado WLTP⁷ no se ajusta del todo a la realidad, por lo que más adelante, en el análisis de sensibilidad, se aplicarán valores más reales.

Con la media de 16,03 kWh/100km, se puede calcular la energía necesaria para 250.000km. El resultado es 40 075 kWh, es decir, 40,075 MWh. Los impactos medioambientales vendrán definidos por el origen de esta energía, que claramente varían dependiendo del país.

⁷ Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

Con el objetivo de analizar el impacto de la procedencia de la energía para cargar el BEV, se van a abarcar distintos ejemplos de porcentajes de producción de energía renovable, estudiando dos localizaciones distintas. En primer lugar, Estados Unidos, que presenta el siguiente mix energético, según U.S. Energy Information Administration [30]:

Tabla 10: Mix energético USA, 2023

LC Stage	Process name	data pt	Units
USA Mix de generación de electricidad	Energía eólica	22.7	%
	Energía hidráulica	9	%
	Energía solar	11.6	%
	Energía nuclear	22	%
	Energía de combustibles fósiles (Carbón)	3	%
	Energía ciclo combinado	25.3	%
	Otros	6.4	%

En este caso, la energía renovable es un 21,4% de la producción total. La segunda localización que se va a modelar es Europa, que presenta el siguiente mix [31], donde se aprecia que la potencia generada por energía renovable representa el 38,39% del total.

Tabla 11: Mix energético EU, 2022

LC Stage	Process name	data pt	Units
EU Mix de generación de electricidad	Energía eólica	15.06	%
	Energía hidráulica	10.10	%
	Energía solar	7.28	%
	Energía nuclear	21.92	%
	Energía de combustibles fósiles (Carbón)	15.94	%
	Energía ciclo combinado	19.96	%
	Biogeneración	5.95	%

Más adelante en el análisis de sensibilidad se estudiarán otros porcentajes de uso de renovables para ver el impacto que tiene.

6.2.2.2 ICEV

En el caso del vehículo de combustión interna, al modelarse exactamente el motor del golf A4, es coherente utilizar ese consumo para el cálculo. Según el LCI del Volkswagen Golf A4, tiene un consumo NEDC⁸ de 6,55L por cada 100 km [24]. Al igual que antes, se utilizará este valor inicialmente y, más adelante, se variará para ver el impacto. Con ese valor, se obtienen 16.375 litros de gasolina.

La producción de gasolina se ha modelado mediante la base de datos Ecoinvent [20], donde en ese proceso, se considera la complejidad y especificidad de las refinerías de petróleo, que varían ampliamente en términos de configuración, tipos de crudo procesado, y productos finales debido a factores geográficos, regulaciones ambientales, y características del mercado.

El modelo de refinación se basa en BREF⁹ y datos específicos de refinerías para simular las operaciones de refinado. Se generan LCI ajustando parámetros como la complejidad de la refinería, contenido de azufre del crudo, y gravedad API para reflejar las condiciones promedio.

Además de los impactos causados por la producción de la gasolina, se añadirán las emisiones del tubo de escape, a lo largo de los 250.000km modelados. Según el LCI del golf [24], tiene unas emisiones de 154 g CO₂/km, por lo que serán un total de 38.500 kg CO₂ en su vida útil.

6.2.3 ETAPA DE FINAL DE VIDA

El proceso de reutilización y reciclaje es esencial para la gestión medioambiental adecuada de los vehículos y sus componentes. Una vez el vehículo se entrega a un Centro Autorizado de Tratamiento (CAT), se realiza una descontaminación inicial. Se extraen y gestionan los

⁸ New European Driving Cycle

⁹ Best Available Techniques (BAT) Reference Document (BREF) for the Refining of Mineral Oil and Gas

líquidos y componentes peligrosos como aceite, líquido de frenos, combustible, y anticongelante.

Tras la descontaminación, se desmontan y recuperan las piezas que aún son útiles. Estas piezas se testean, clasifican y almacenan para su venta como recambios de segunda mano. Lo que queda del vehículo, principalmente su estructura metálica, se compacta en un cubo mediante una prensa. Estos cubos se envían a la industria metalúrgica para su reciclaje.

Finalmente, en las instalaciones de fragmentación, se separan y clasifican los diferentes materiales. Los metales se recuperan mediante imanes y otros procesos, mientras que los plásticos, vidrios y textiles se procesan para su reutilización o reciclaje en diferentes industrias.

En el caso de España, la Directiva 2000/53/CE y el Real Decreto de transposición al derecho interno español (265/2021 que sustituye al 1383/2002, modificado a su vez por el 20/2017) establecen los objetivos de recuperación de vehículos al final de su vida útil que se debían alcanzar a partir de 2006 y los que se deben alcanzar desde el año 2015 [32]. Establece la reutilización y reciclado hasta un mínimo del 85% del peso medio por vehículo y año.

En la Figura 31, se muestran los datos publicados en 2019 por la Comisión Europea que los niveles reportados por España fueron 86,20% de reutilización y reciclado y 93,10% de recuperación total.

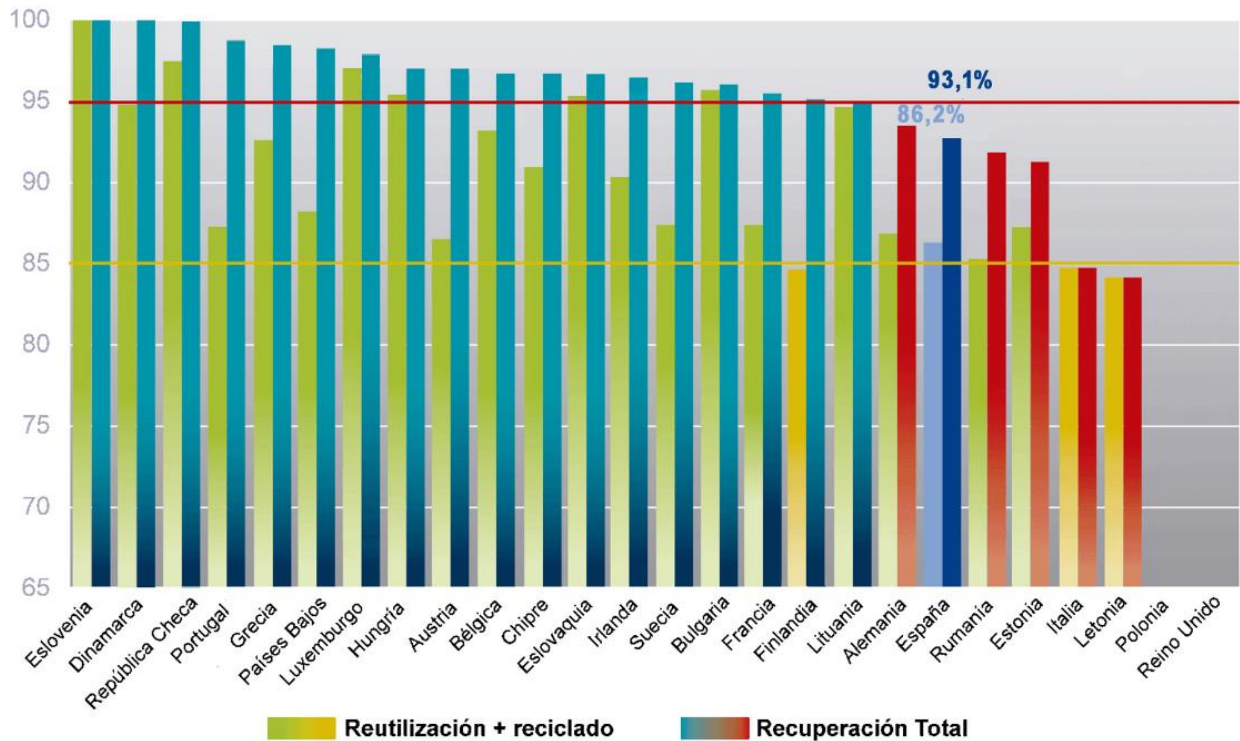


Figura 31: Datos relativos de reciclaje de vehículos en 2019 [33]

6.2.3.1 BEV

En el caso de los vehículos eléctricos, el reciclaje de baterías está ganando terreno como parte fundamental de la transición hacia una economía circular y sostenible. Por lo que en esta etapa se va a estudiar el reciclaje del powertrain eléctrico, que engloba los elementos mencionados en la etapa de fabricación, es decir, motor eléctrico, inversor, convertidor, VCU, cargador, cables, etc. Este proceso de tratamiento se ha obtenido de la base de datos de Ecoinvent, a través de Brusa, al igual que los procesos de fabricación de esos componentes. El elemento que no entra en este proceso es la batería, por lo que se va a estudiar por separado.

En el estudio del pack de baterías, se han hallado dificultades a la hora de encontrar información fiable sobre el proceso de reciclaje, debido a la poca maduración que tiene el tema. Además, en la actualidad están surgiendo empresas de reciclaje de baterías, las cuales están compitiendo en el “know how” de este proceso, lo cual hace que no compartan

información específica sobre esta evolución. Por ello, se ha decidido utilizar literatura existente de los impactos causados por el proceso de reciclaje de baterías. Se han estudiado los siguientes artículos:

- *“Research on Spent LiFePO₄ Electric Vehicle Battery Disposal and Its Life Cycle Inventory Collection in China”* [34]
- *“Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling. The Scope-lib process”* [35]
- *“Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries”* [36]
- *“Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs”* [37]

6.2.3.2 ICEV

Para esta etapa, los datos se han obtenido de la base de datos Ecoinvent [20], donde se ha seleccionado el proceso de tratamiento de un vehículo de combustión interna. El resultado es dado por kg, por lo que el resultado total estará multiplicado por los 1181 kg del Golf A4 [24].

6.3 LCIA

Se ha decidido representar los resultados en proporción del impacto más alto de cada categoría, con ello se consigue una comparación más visual y directa de los impactos.

6.3.1 RESULTADOS AGRUPADOS

En primer lugar, se van a presentar los resultados agrupados en producción, uso y final de vida, con el objetivo de ver qué etapa tiene mayor peso.

6.3.1.1 Porcentaje de renovables de Europa (Véase Mix energético EU, 2022)

Como se ha mencionado anteriormente, el porcentaje de renovables de Europa representa el 38,39% del total. Los resultados son los siguientes:

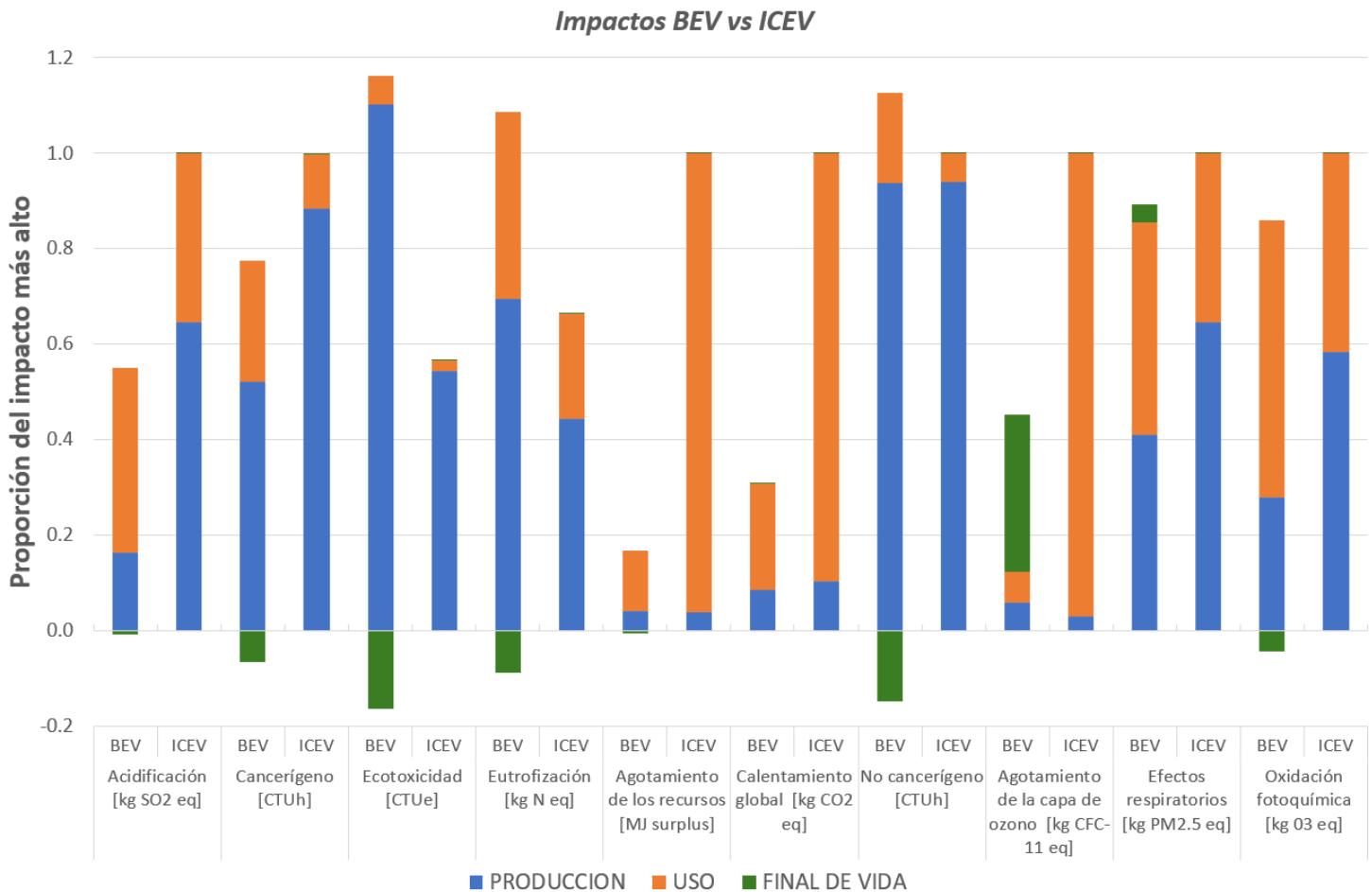


Figura 32: Impactos BEV vs ICEV con un 38,39% de renovables

En primer lugar, para un mejor entendimiento de los resultados, se presenta una tabla en la que se resume las categorías de impactos donde una tecnología ha sido mayor que la otra:

Tabla 12: Tecnología que tiene mayores impactos según categorías

	ICEV	BEV
Acidificación [kg SO ₂ eq]	X	
Cancerígeno [CTUh]	X	
Ecotoxicidad [CTUe]		X
Eutrofización [kg N eq]		X
Agotamiento de los recursos [MJ surplus]	X	
Calentamiento global [kg CO ₂ eq]	X	
No cancerígeno [CTUh]	X	
Agotamiento de la capa de ozono [kg CFC-11 eq]	X	
Efectos respiratorios [kg PM _{2.5} eq]	X	
Oxidación fotoquímica [kg O ₃ eq]	X	

En términos generales, el vehículo de combustión interna tiene mayores impactos en la mayoría de las categorías, estando bastante igualado en el caso de no carcinogénicos, efectos respiratorios y oxidación fotoquímica. En el caso de acidificación, y carcinogénicos los impactos del BEV representan, respectivamente, el 55% y el 78% de los del ICEV. En contraposición, los impactos del ICEV en ecotoxicidad y eutrofización, representan un 58% y 65% de los del BEV. En el caso del potencial de calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de los recursos, el BEV tiene unas emisiones mucho menores, siendo del 30%, 45% y 18% respectivamente.

Desglosando por etapas, en la etapa de producción, como era de esperar, tiene un gran peso en muchas categorías. Concretamente, tiene un peso mayor del 80% en carcinogénicos, no carcinogénicos y ecotoxicidad. En la mayoría de las categorías tiene un peso entre el 40-80%. Sin embargo, en el caso de potencial de calentamiento global, eliminación de la capa de ozono y agotamiento de los recursos, los impactos causados por la producción son menores de 20%. Esto se debe a que los principales contaminantes en esas categorías provienen del uso de los vehículos en mayor medida, como se comentará en breve.

Analizando la etapa de uso, sus mayores impactos vienen en las tres categorías anteriores, ya que los principales contaminantes son el CO₂, propio de las emisiones de los ICEV. Además, se produce el agotamiento de los combustibles fósiles mediante la producción de gasolina a través del petróleo. En este proceso también se emiten clorofluorocarbonos (CFC) e hidroc fluorocarbonos (HCFC) propiciando el agotamiento de la capa de ozono.

Finalmente, en la etapa de final de vida, mediante el reciclaje de las baterías, se ha conseguido reducir un 15% los impactos causados por ecotoxicidad y no carcinógenos. En menor medida también los carcinógenos y eutrofización. Por el contrario, esto ha generado que el BEV pase del 15% al 45%, respecto del ICEV, en el agotamiento de la capa de ozono.

6.3.1.2 Porcentaje de renovables de USA (Véase Mix energético USA, 2023)

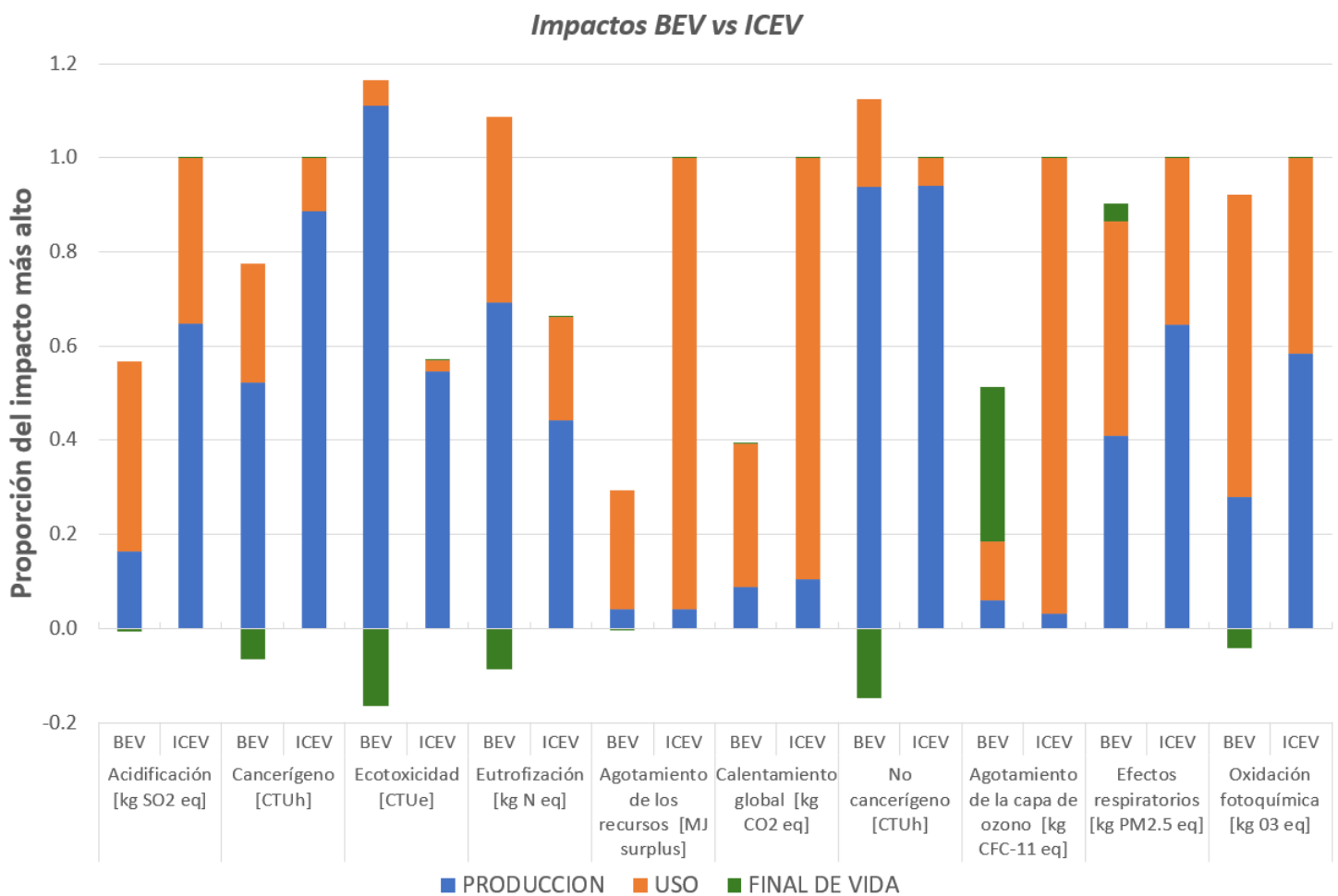


Figura 33: Resultados ICEV vs BEV con un 21.4% de renovables

En este caso, los impactos del BEV han sufrido ciertas variaciones:

- En la categoría agotamiento de los recursos, se ha pasado de un 17% al 29%, es decir, ha aumentado un 12% respecto de los impactos de ICEV.
- Los impactos del potencial de calentamiento global también se han incrementado un 10% respecto del ICEV.
- También ha habido un aumento del 6.5% en los impactos de agotamiento de la capa de ozono, y de un 7.5% para la formación de la capa del cielo de contaminación mediante la oxidación fotoquímica.

En conclusión, debido a un menor porcentaje de renovables se ha visto un aumento en los impactos de las categorías que anteriormente se comentaba que dependían mayoritariamente por la etapa de uso.

6.3.2 RESULTADOS DESGLOSADOS

En este apartado se van a mostrar los resultados diferenciando la contribución de todos y cada uno de los componentes en la etapa de producción de ambas tecnologías. Las etapas de uso y final de vida se han dejado del mismo color, naranja y verde oscuro respectivamente, por lo que las diferencias se apreciarán dentro de la etapa de producción.

Cabe destacar que es indiferente utilizar el porcentaje de renovables de EU o USA, ya que esta variación era para la etapa de uso. La energía necesaria para la etapa de producción ya se ha tenido en cuenta al modelar los componentes según el lugar de fabricación. Así pues, los resultados son los siguientes:

Impactos BEV vs ICEV

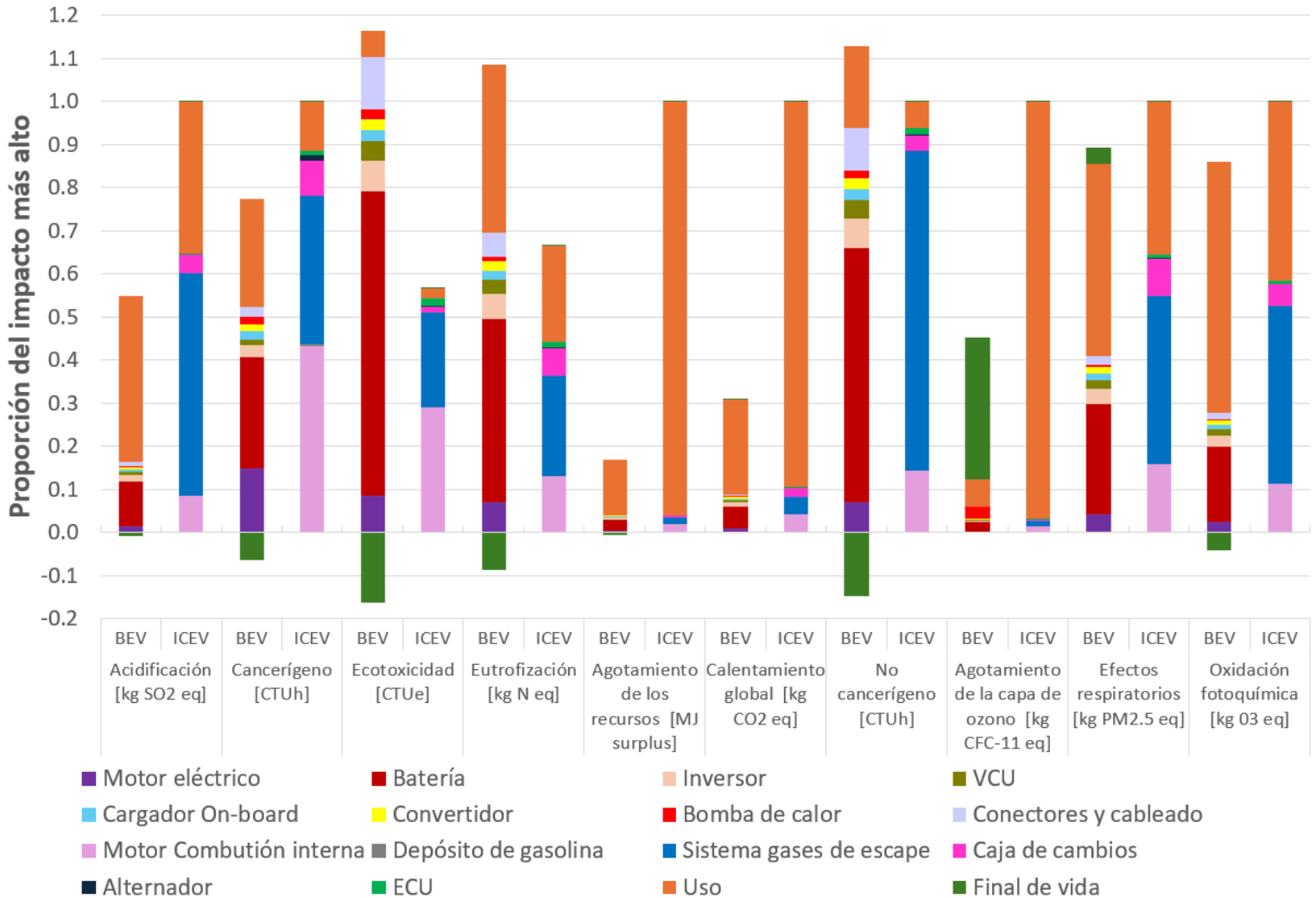


Figura 34: Resultados ICEV vs BEV desglosando los componentes

6.3.2.1 Resultados del BEV

Se aprecia como el principal contribuyente es la batería, en rojo oscuro, que tiene un impacto ambiental considerable debido a su composición y el proceso de fabricación. Este peso significativo se debe principalmente a la extracción de materiales como litio, hierro, fósforo cuya obtención es intensiva en recursos y a menudo conlleva problemas ambientales y sociales, como la degradación del suelo y la contaminación del agua. Durante estos procesos, si no se gestionan adecuadamente, pueden generarse emisiones nocivas.

Es por ello por lo que los principales impactos son de ecotoxicidad, eutrofización y no carcinógenos, representando más de 80% de los impactos de producción.

El segundo componente con mayores impactos parece ser el motor eléctrico, representado en color morado en la gráfica, contribuye notablemente a la acidificación, debido a las emisiones de dióxido de azufre y otros gases ácidos que se derivan de la producción de los metales y otros materiales necesarios para su fabricación. Además, muestra impactos en la categoría de carcinogénicos, lo que sugiere que los materiales o procesos utilizados en su producción podrían estar asociados con sustancias que incrementan el riesgo de cáncer.

También, tiene una influencia significativa en la ecotoxicidad, indicando que los componentes del motor eléctrico pueden liberar sustancias tóxicas que afectan a los ecosistemas naturales. Asimismo, el motor contribuye a la eutrofización, resultado de los procesos industriales empleados en la fabricación, contribuyendo al crecimiento excesivo de algas en cuerpos de agua.

Aunque no es el mayor contribuyente en las categorías de calentamiento global y oxidación fotoquímica en comparación con la batería, todavía presenta impactos significativos en estas áreas.

El siguiente componente es el inversor, ya que tiene una presencia notable, entre el 20-30%, en las categorías de ecotoxicidad, no carcinógenos y eutrofización. Su contribución en la categoría de no carcinógenos involucra el uso o la liberación de sustancias que, si bien no son cancerígenas, podrían tener otros efectos adversos para la salud humana, como irritantes o toxinas.

En menor medida y casi en la misma proporción, se tiene los impactos causados por el VCU, el cargador, el convertidor o la bomba de calor. También cabe destacar que el cableado tiene un porcentaje mayor que el inversor y el motor en la ecotoxicidad y no carcinógenos.

6.3.2.2 Resultados del ICEV

Los elementos que mayor peso tienen son el sistema de gases de escape, el motor de combustión interna y la caja de cambios.

Sistema de gases de escape

La producción de convertidores catalíticos incide altamente en casi todas las categorías debido a los complejos procesos y materiales involucrados. Analizando los más significativos:

- La acidificación y la eutrofización, en las cuales las emisiones de óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x) durante la fabricación reaccionan en la atmósfera para formar ácidos, los cuales precipitan como lluvia ácida y afectan tanto a ecosistemas acuáticos como terrestres, dañando la flora y fauna local.
- En relación con los carcinogénicos y no carcinogénicos, 30% y 75% respectivamente, la utilización de metales pesados y químicos peligrosos, que se liberan al medio ambiente durante los procesos de producción, poseen propiedades que pueden aumentar el riesgo de cáncer. Estos incluyen compuestos como níquel y cromo, conocidos por sus efectos carcinogénicos. Además, los disolventes y otros químicos volátiles empleados pueden impactar la calidad del aire y contribuir a efectos tanto carcinogénicos como no carcinogénicos, dependiendo de su toxicidad y la exposición humana a estos compuestos.
- La formación de smog está relacionada con las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y NO_x , que, bajo la influencia de la luz solar, forman ozono a nivel del suelo, un componente principal del smog urbano.

Motor de combustión interna

Durante la producción del motor se generan impactos significativos en categorías ambientales como carcinogénicos, ecotoxicidad, eutrofización y efectos respiratorios debido a los procesos y materiales involucrados.

En el caso de los carcinogénicos contribuye en un 50%, donde la utilización de sustancias químicas y solventes pueden incluir compuestos orgánicos volátiles y otros químicos potencialmente cancerígenos en pinturas, lubricantes y recubrimientos. Estos compuestos se liberan durante la aplicación y el curado, y se agrava por la generación de humos y partículas finas que contienen metales durante el mecanizado y el tratamiento térmico de piezas metálicas.

En la ecotoxicidad el motor genera el 55% del impacto, la cual se ve afectada por los residuos y las emisiones de estos procesos, que incluyen contaminantes como metales pesados e hidrocarburos, los cuales se acumulan en el suelo y el agua, dañando la vida acuática y terrestre. Los lubricantes y otros fluidos usados también pueden resultar en derrames que contaminan estos mismos ecosistemas.

Por otro lado, la eutrofización, con un 33%, es impulsada por la liberación de nitratos y fosfatos desde las aguas residuales industriales, alimentando el crecimiento excesivo de algas que degradan la calidad del agua y disminuyen los niveles de oxígeno, lo que afecta negativamente a la vida acuática.

Finalmente, los efectos respiratorios se ven contribuidos por la liberación de partículas finas y aerosoles durante operaciones como el mecanizado y el tratamiento térmico, lo que deteriora la calidad del aire y puede provocar afecciones respiratorias tanto en los trabajadores como en las comunidades cercanas a las plantas de producción.

Caja de cambios

Los resultados muestran que la producción incide principalmente en carcinogénicos, eutrofización y efectos respiratorios, en un 12,5%, 20% y 18% respectivamente. Al tener un proceso de producción similar al del motor, las emisiones van relacionadas ya que, durante la fabricación de cajas de cambios, se emplean diversos lubricantes y aceites que pueden contener sustancias químicas peligrosas como ciertos tipos de aceites basados en petróleo o aditivos que se usan para mejorar el rendimiento de los engranajes bajo condiciones extremas de operación. En este proceso también se generan partículas y polvo, contribuyendo a las emisiones de efectos respiratorios.

6.3.3 COMPARATIVA EMISIONES DE CO₂

En este apartado se va a comparar las emisiones de CO₂ a lo largo de la vida útil. Además, se hará una diferenciación en la etapa de producción y en la de uso.

6.3.3.1 Etapa de producción y final de vida

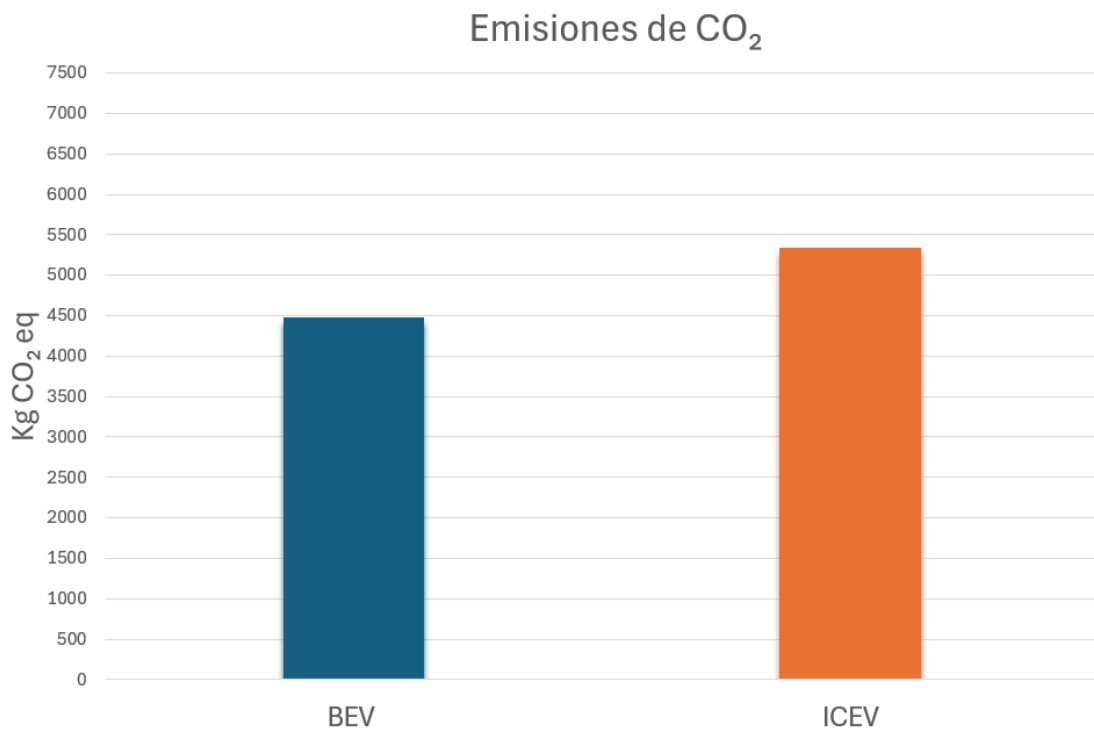


Figura 35: Emisiones de CO₂ en la producción y final de vida

En la figura anterior se muestra las emisiones de CO₂ debidas a la producción y final de vida que tienen ambas tecnologías. Cabe recordar que estos impactos son los ocasionados por los elementos que son distintos de ambas tecnologías. Se aprecia como las emisiones en la producción de ambos vehículos es bastante similar, siendo en 19% mayores las del ICEV. Si se tiene en cuenta que se ha establecido que la vida útil de la batería es de 250.000km, si se contempla un escenario en el que el coche va a alcanzar 500.000km, los resultados serían los siguientes:

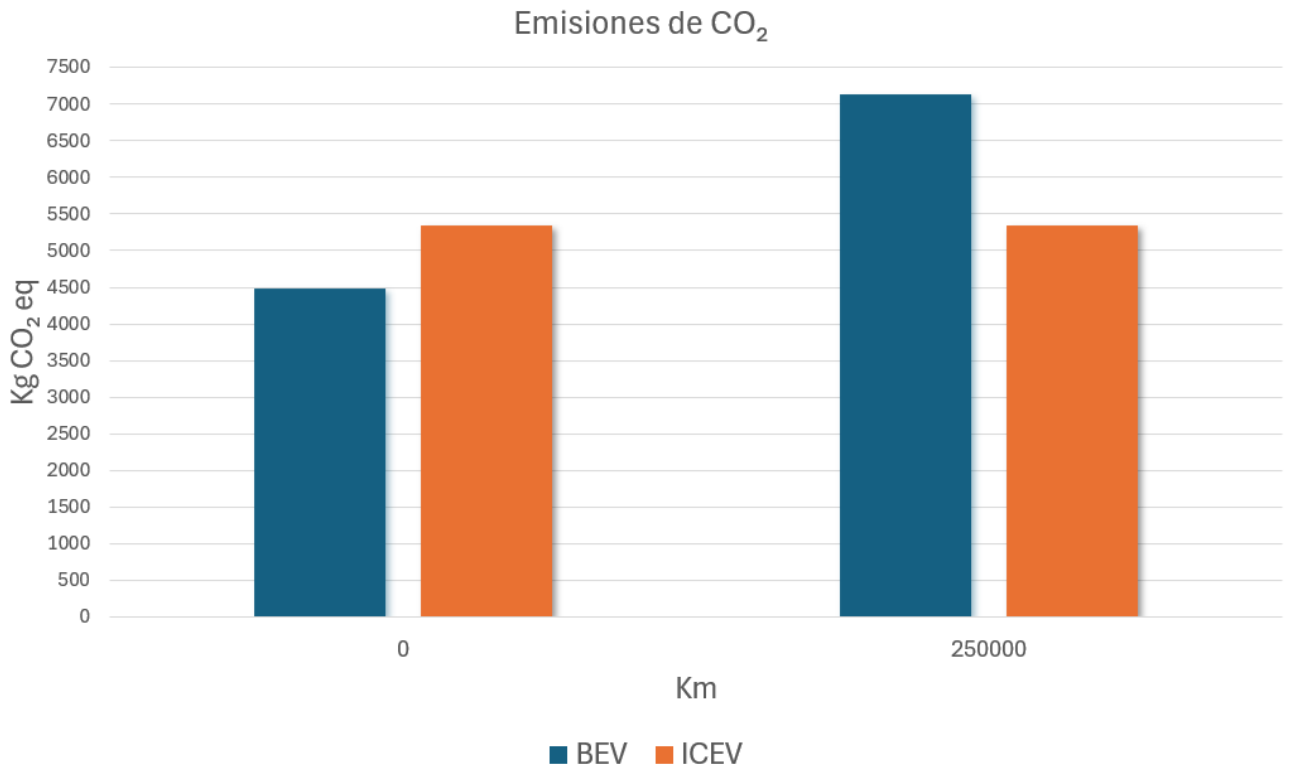


Figura 36: Emisiones de CO₂ con cambio de batería

En este escenario sería necesario el reemplazo de la batería, lo que conlleva la suma de las emisiones pertinentes, siendo en ese caso¹⁰ las del BEV un 31,14% mayores que las del ICEV.

¹⁰ Esto considerando que los demás componentes no necesitan recambio en ninguna tecnología

6.3.3.2 Etapa de uso

En esta etapa se van a mostrar las emisiones debidas al uso de ambos vehículos a lo largo de un espacio temporal de 1.000.000km:

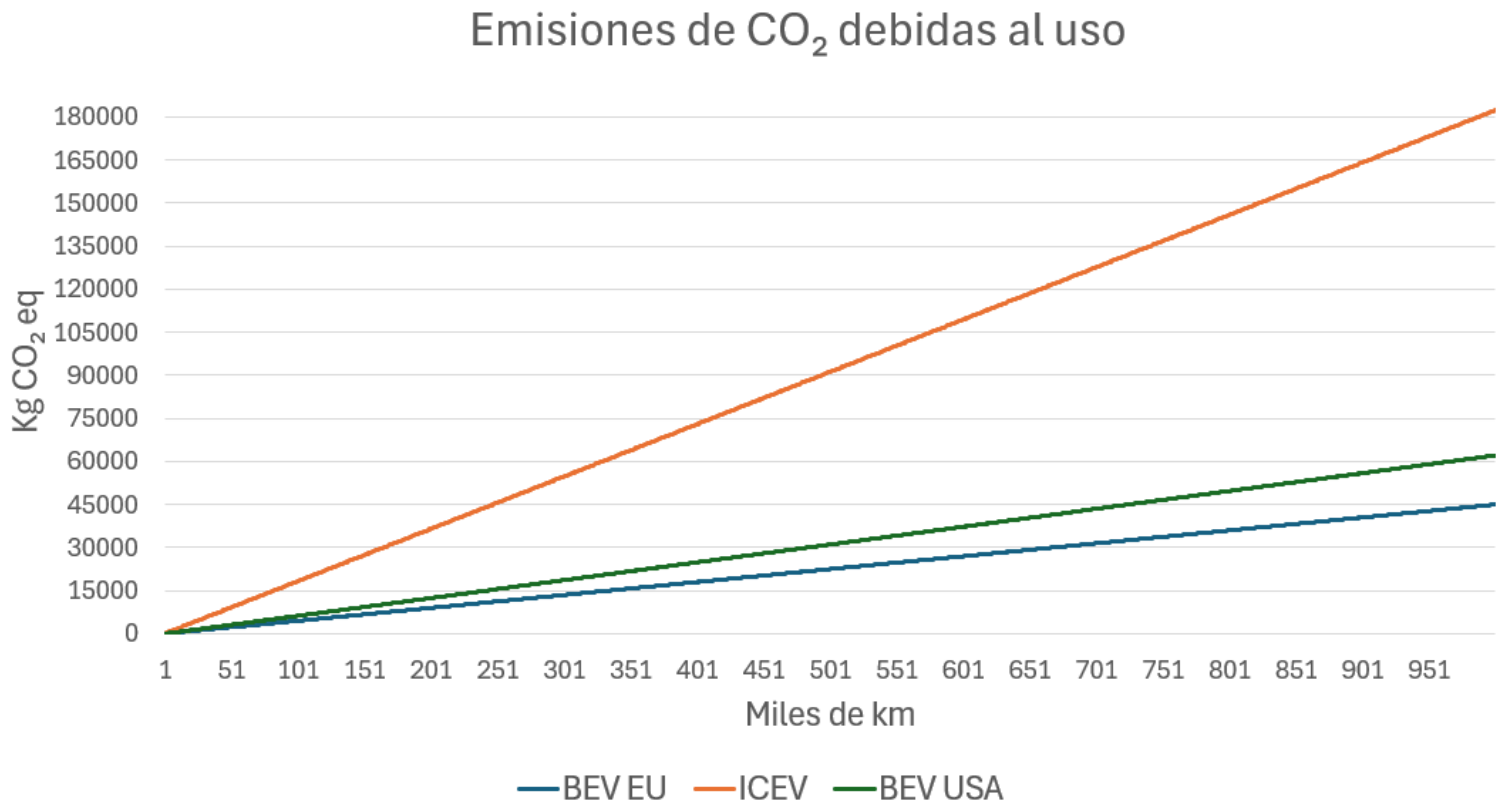


Figura 37: Emisiones de CO₂ durante la etapa de uso

Los aspectos más importantes de la figura anterior son los siguientes:

- En primer lugar, se ha tenido en cuenta el porcentaje de renovales para la recarga del vehículo eléctrico. A los 250.000km, en el caso del mix de USA se habrán emitido 15 toneladas de CO₂, frente a las 11,12 toneladas del de Europa, lo que representa un 38% más. Esta relación se mantiene hasta el 1.000.000 de km, momento en el cual serán 62,13 frente a 45 toneladas.
- Se aprecia claramente como las emisiones por parte del ICEV son mucho mayores, propias de la combustión del motor y de la obtención de la gasolina. A los 250.000km el ICEV habrá emitido 45 toneladas de CO₂, frente a las 20 o 16 toneladas del BEV,

representando un 225% o un 281%. En el caso del millón de km, ahora la relación no es lineal, se tienen 182,31 toneladas por parte del ICEV, frente a las 62,13t o las 45t, casi el triple o el cuádruple de emisiones, respectivamente.

6.3.3.3 Ciclo de vida entero

En este caso se va a mostrar las emisiones de CO₂ en el ciclo entero de vida, teniendo en cuenta las tres etapas anteriores. No se ha considerado el reemplazo de ningún elemento en ninguna de las tecnologías excepto la batería cada 250.000km.

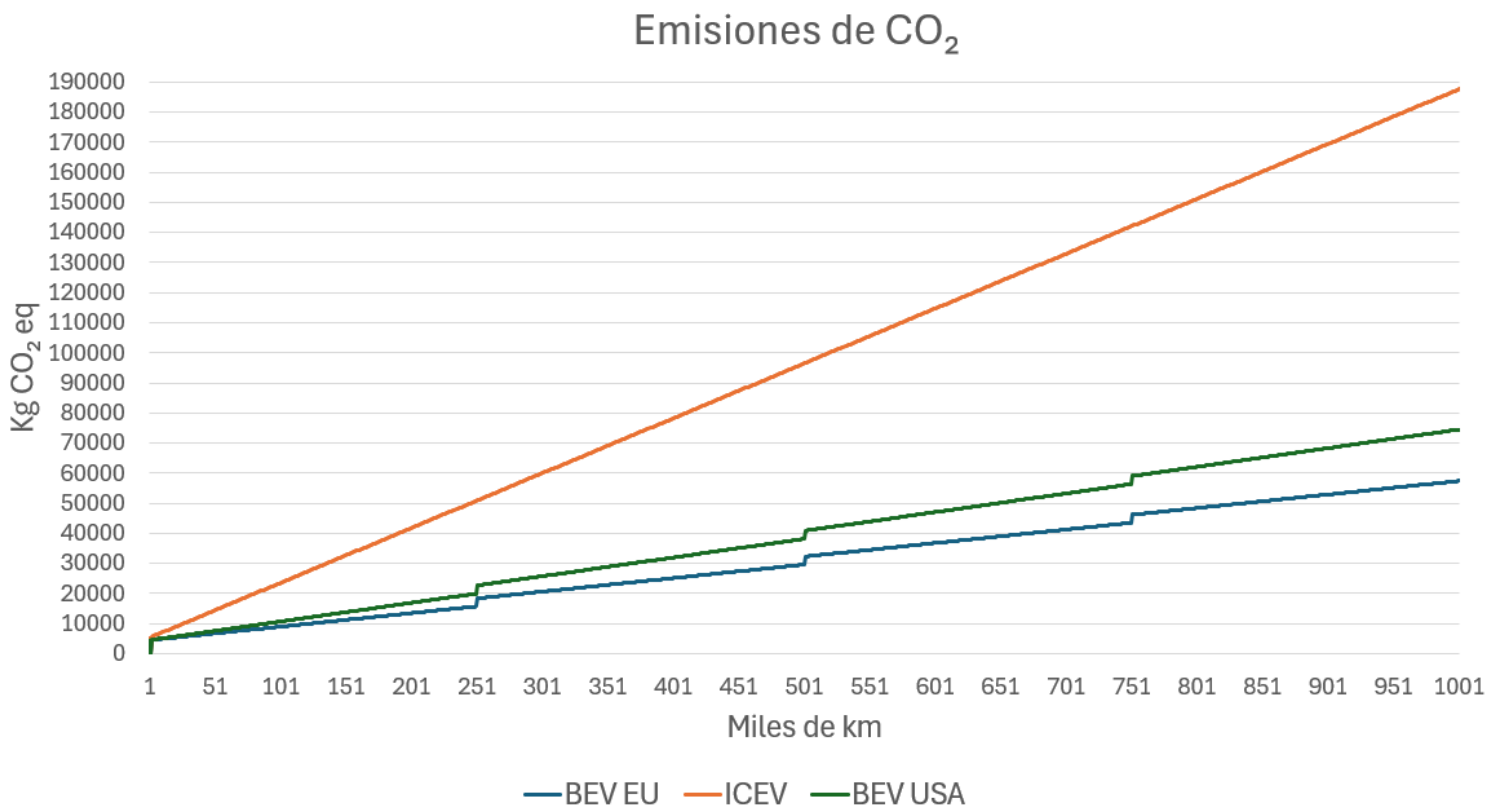


Figura 38: Emisiones de CO₂ en el ciclo de vida entero

Se aprecia como la gráfica empieza con el valor de emisiones de la producción, vistas anteriormente, y poco a poco van aumentando según los km que se van recorriendo. También se ve claramente como cada 250.000km hay un incremento debido al reemplazo de la batería. Aún con las emisiones de la nueva batería, la cantidad de emisiones no es comparable con las del ICEV en ese momento.

Como conclusión en las emisiones de CO₂, las generadas por el ICEV durante la etapa de uso son mucho mayores que las BEV, lo cual hace que, observando el ciclo de vida entero y teniendo en cuenta los reemplazos de batería, las emisiones de CO₂ de los BEV en Europa sean del 35,14% a los 250.000km. En un caso menos bueno, como es el de USA, las emisiones de CO₂ del BEV siguen representando un 44% del ICEV.

6.3.4 COMPARATIVA EMISIONES SO_x

En este apartado se va a analizar en profundidad las emisiones de óxidos de azufre, principalmente el dióxido de azufre (SO₂), ya que representan contaminantes clave debido a sus significativas implicaciones tanto en la calidad del aire como en la salud pública y los ecosistemas.

Cuando el dióxido de azufre se combina con el vapor de agua en la atmósfera, forma ácido sulfúrico que cae como lluvia ácida. Esta lluvia afecta negativamente la vida acuática, ya que la acidificación de los cuerpos de agua altera drásticamente la composición de estos ecosistemas, afectando la supervivencia de varias especies en entornos más ácidos [38]. También, los óxidos de azufre pueden formar partículas finas que reducen la visibilidad, representando un problema particularmente grave en áreas urbanas y parques nacionales.

En términos de salud humana, la inhalación de puede causar irritación en la nariz y la garganta, así como dificultades respiratorias y otras afecciones pulmonares, siendo particularmente perjudicial para personas con asma o enfermedades respiratorias crónicas. Además, este contaminante está relacionada con un aumento en los riesgos de ataques al corazón y otras condiciones cardiovasculares. El valor límite diario (VLD) para la protección de la salud humana (fecha de cumplimiento: 1 de enero de 2005) según la legislación española es un valor medio de 125 µg/m³ en un periodo de 24h. [39]

En la siguiente figura se muestran los resultados en la etapa de fabricación:

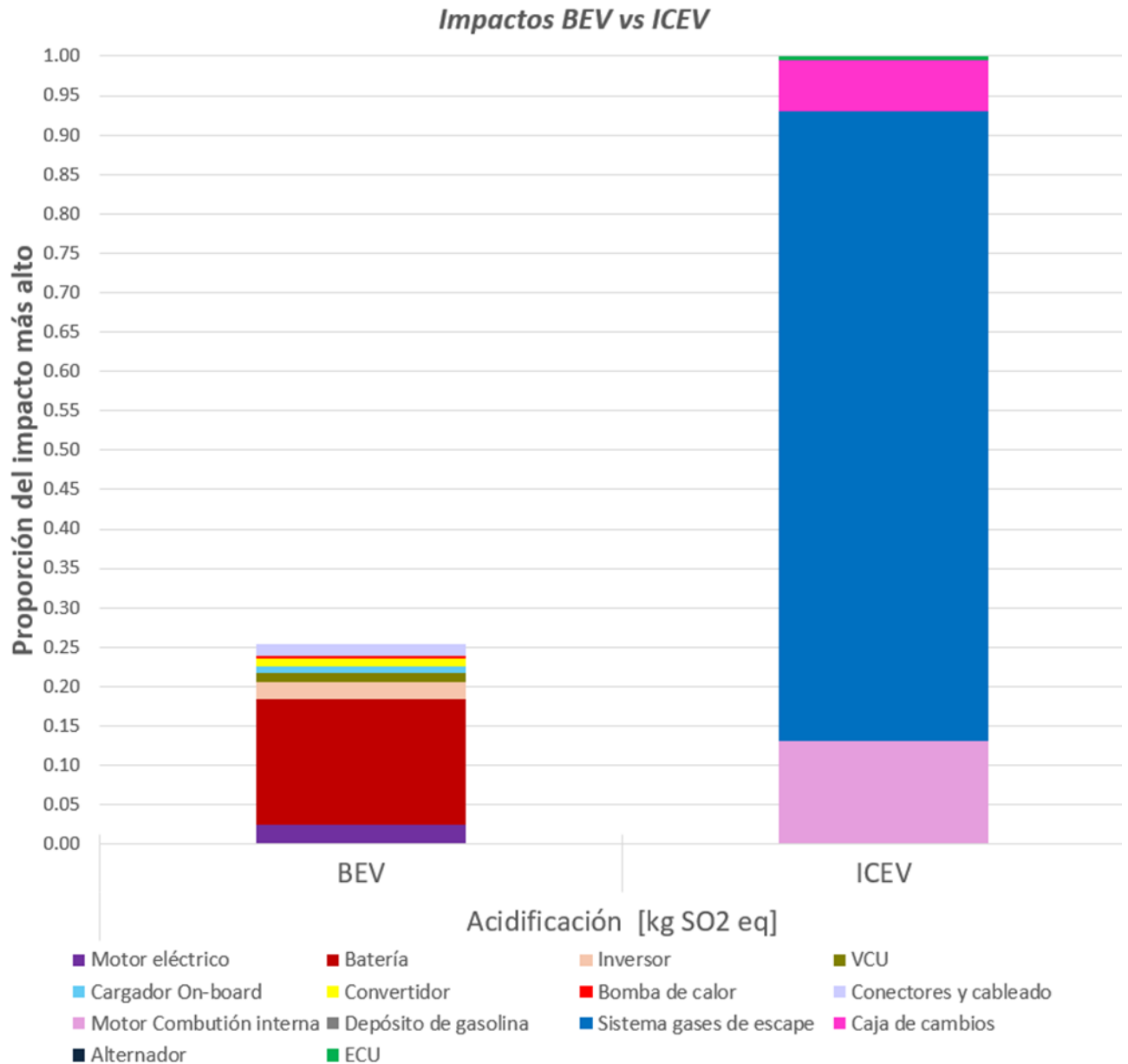


Figura 39: Emisiones de SO₂ en la etapa de fabricación

- Las emisiones del BEV representan el 25% de las del ICEV, siendo la principal emisora la fabricación de la batería con un 16%. En menor medida se tiene el motor eléctrico y el inversor que representan un 2,5% cada uno y, finalmente cada uno de los demás componentes alrededor de 1%.

- En el caso del ICEV, el mayor emisor es el sistema de gases de escape con un 80%, debido al convertidor catalítico, el cual conlleva para su fabricación la extracción y refinación de metales preciosos como el platino, el paladio o el rodio, que posteriormente se calientan a altas temperaturas, lo que puede liberar dióxido de azufre. Además, se necesita mucha energía que, si proviene de la quema de combustibles fósiles, se emitirá más SO₂ durante el proceso. A veces, el proceso de fabricación también puede usar químicos como el ácido sulfúrico para purificar estos metales, lo que puede contribuir aún más a estas emisiones.
- De manera similar, se tiene el motor de combustión interna con un 13% y la caja de cambios con un 6%. Los procesos de extracción y refinación del aluminio, acero o hierro son menos intensivos en términos de emisiones de SO₂ en comparación con los metales preciosos.

En cuanto a la etapa de uso:

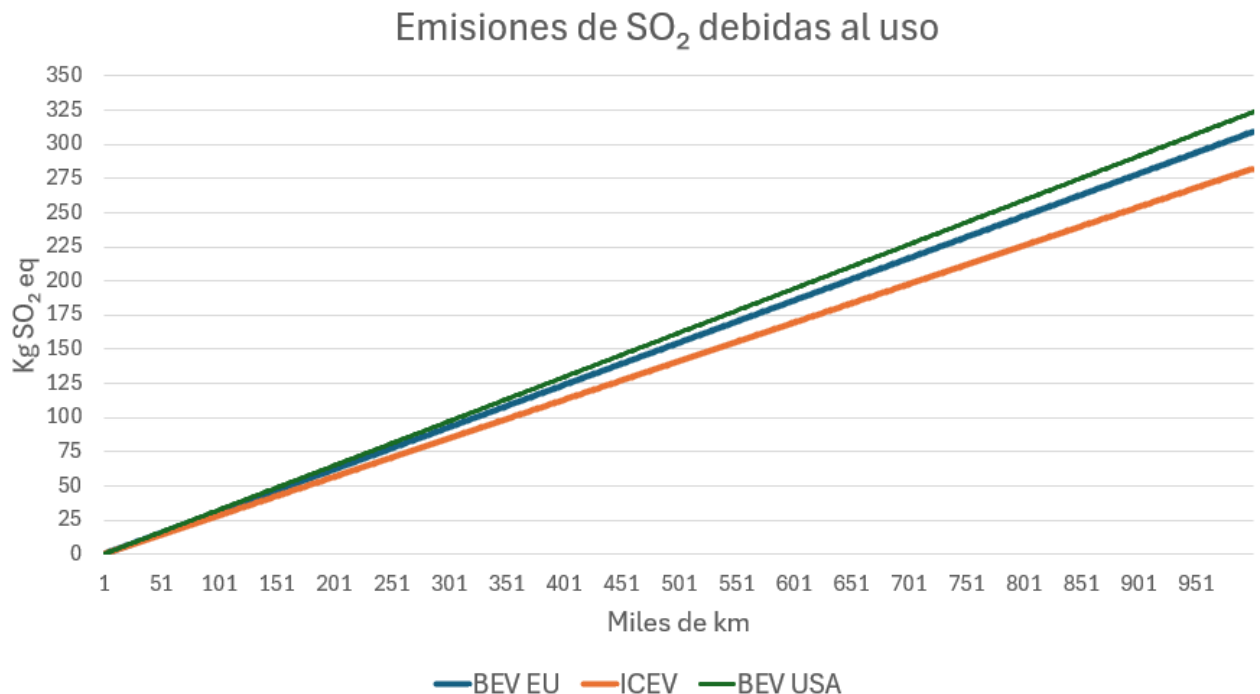


Figura 40: Emisiones de SO₂ en la etapa de uso

Como se aprecia en la Figura 40, en la etapa de uso, las emisiones del BEV son mayores, a los 250.000km, se habrán emitido 77,6 kg y 81,19 kg de SO₂ por parte de los BEV en EU y USA respectivamente, frente a los 70,85 kg del ICEV. Lo que representa un 14,67% más en el caso de USA respecto del ICEV y un 9,57% más en el de EU respecto del ICEV.

Estas mayores emisiones están relacionadas principalmente con las emisiones indirectas asociadas a la generación de la electricidad necesaria para cargar el vehículo eléctrico. Si la electricidad utilizada proviene de fuentes que queman combustibles fósiles ricos en azufre, las emisiones de SO₂ pueden ser significativas. Tanto en cuanto que con la diferencia de renovables entre USA y EU hace que por el uso del BEV hubiera un 4,65% más de emisiones de SO₂ en el país norteamericano.

6.3.5 COMPARATIVA EMISIONES NO_x

En este apartado se va a analizar en profundidad las emisiones de óxidos de nitrógeno, concretamente NO y NO₂. Los NO_x son ingredientes clave en la formación de ozono troposférico (Oxidación fotoquímica, “Smog”). En presencia de luz solar y compuestos orgánicos volátiles, los NO_x reaccionan para formar ozono. Aunque el ozono en la estratosfera protege contra la radiación ultravioleta, a nivel del suelo es un contaminante nocivo que puede causar o agravar problemas respiratorios, dañar cultivos, etc.

Además, contribuyen a la eutrofización de las masas de agua. Al depositarse en ríos, lagos y mares, pueden aumentar los nutrientes disponibles, en particular el nitrógeno, lo que provoca un crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas. Esto puede llevar a la disminución del oxígeno disuelto en el agua, afectando la vida acuática y alterando los ecosistemas. La eutrofización puede también llevar a la formación de zonas muertas en cuerpos de agua, donde el oxígeno es tan escaso que la vida acuática no puede sobrevivir.

El dióxido de nitrógeno reacciona en la atmósfera con agua, oxígeno y otros químicos para formar ácido nítrico. Este ácido se deposita en la superficie terrestre en forma de precipitación afectando negativamente a los ecosistemas acuáticos y terrestres acidificando

los lagos y ríos reduciendo la biodiversidad y alterar la química del suelo afectando la vegetación y la agricultura.

Valor límite anual (VLA) para la protección de la salud humana (fecha de cumplimiento: 1 de enero de 2010) según la legislación española es un valor medio de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de 24h. [39]

6.3.5.1 Eutrofización

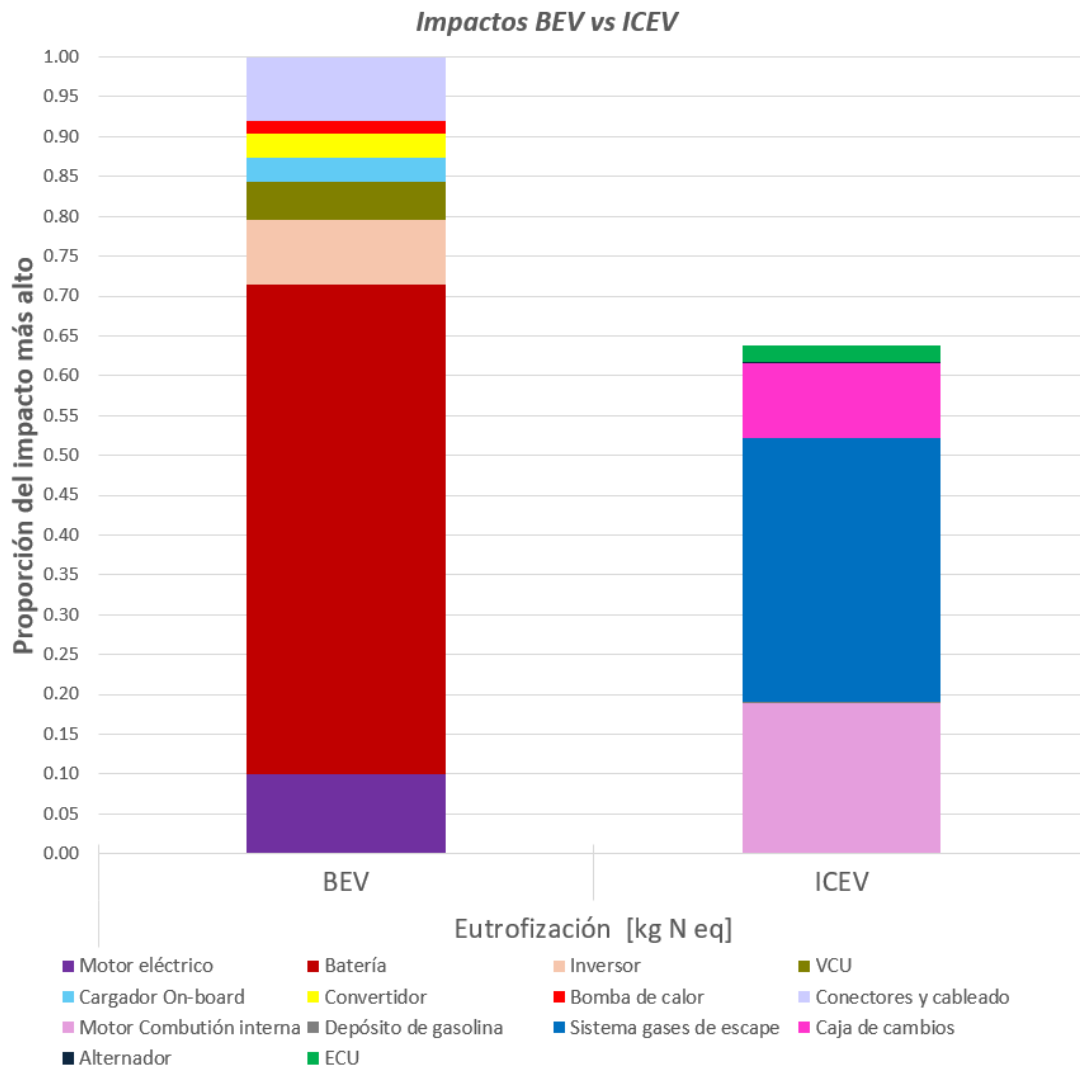


Figura 41: Emisiones potenciadoras de Eutrofización en la etapa de fabricación

- El principal emisor es la batería, representando un 60% de los impactos, debido a los procesos de la extracción de las materias primas como hierro, fósforo o litio. También

por el procesamiento de litio o la síntesis de los compuestos de fosfato. La energía utilizada también es importante ya que la quema de combustibles fósiles es un gran emisor de NO_x. En menor medida se tiene el motor eléctrico, el inversor y el cableado, con un 10%, 8% y 8% respectivamente.

- Por parte del ICEV, al igual que en la emisión de dióxido de azufre, el convertidor catalítico es el principal emisor con un 34%, seguido del motor de combustión interna y la caja de cambios, 19% y 10%.

6.3.5.2 Oxidación fotoquímica (“Smog”)

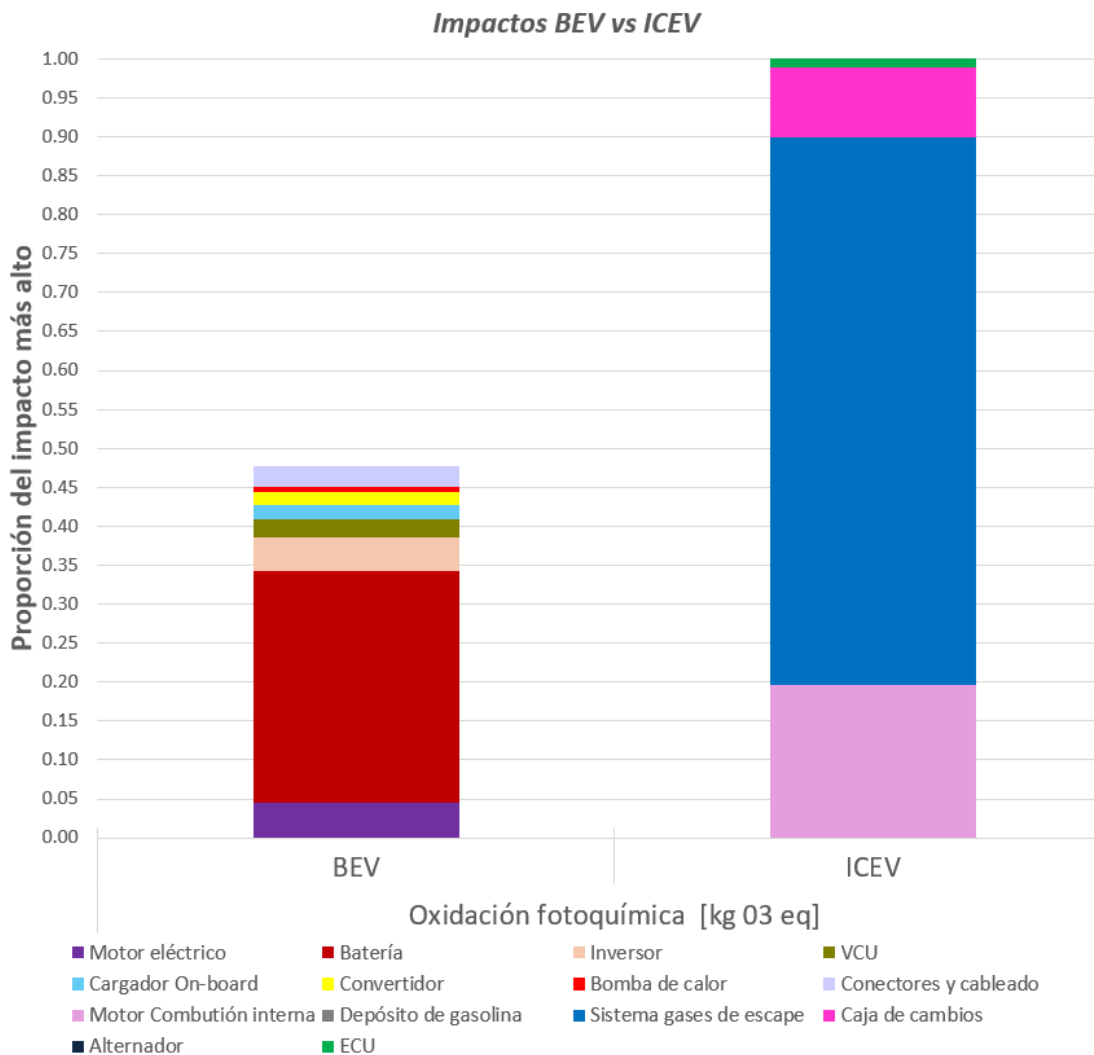


Figura 42: Emisiones potenciadoras de formación de Smog en la etapa de fabricación

En este caso el ICEV tiene mayor potencial de formación de Smog, siendo otra vez el principal emisor el conversor catalítico representando el 70%. El motor de combustión interna representa el 20% y la caja de cambios el 9%. Siguiendo el patrón de los anteriores impactos en el BEV, la batería representa la mayoría, alrededor de un 30%, y le siguen los demás componentes.

Cabe destacar que inicialmente parece no ser coherente que por un lado la fabricación del BEV propicie la formación de la eutrofización y, en cambio, la fabricación del ICEV potencie la formación del Smog cuando ambos impactos vienen derivados de las emisiones de NO_x . Sin embargo, esto se debe a que la fabricación de la batería no tiene tantas emisiones de óxidos de nitrato si no que la minería necesaria puede causar la liberación de nutrientes y químicos en los cuerpos de agua cercanos. Además, los procesos químicos empleados implican sustancias que contienen nitrógeno y fosfato. Junto a esto, el uso intensivo de agua en la fabricación de componentes como los electrolitos hace que las aguas residuales resultantes pueden estar enriquecidas con compuestos propicios para la eutrofización.

Por otro lado, la fabricación de los componentes del ICEV si que tiene emisiones directas de NO_x debido a la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad o a los procesos de alta temperatura necesarios para fundición de metales o procesos de soldadura y pintura que emiten compuestos orgánicos volátiles que reaccionan con los óxidos de nitrógeno en presencia de la luz solar potenciando la formación de Smog.

6.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad es una herramienta clave que se utiliza para determinar cómo la variabilidad en los datos de entrada del modelo de LCA afecta a los resultados obtenidos. Esta técnica es fundamental para evaluar la robustez de los resultados y para identificar qué variables tienen el mayor impacto en los impactos ambientales evaluados.

En esta sección se evaluará la variación en el consumo de energía de los BEVs, expresado en kWh/100 km, para entender cómo las diferencias en la eficiencia energética afectan sus impactos ambientales. Para los ICEVs, se analizará cómo el cambio en el consumo de combustible, medido en L/100km, altera su perfil ambiental, lo que ayudará a comprender la influencia de la eficiencia del motor y las prácticas de conducción. Además, se investigará el impacto de variar el porcentaje de energía renovable utilizada en la carga del vehículo eléctrico, destacando cómo la fuente de electricidad puede modificar significativamente los resultados. Este análisis de sensibilidad es esencial para identificar los factores que más afectan a los impactos ambientales de los vehículos y proporciona una base para promover mejoras tecnológicas y políticas energéticas dirigidas a minimizar dichos impactos.

6.4.1 CONSUMO KWH/100 KM

En el análisis inicial se calculó un consumo medio de 16,03 kWh a los 100km según consumos certificados WLTP. En este apartado se va a aumentar este consumo reflejando situaciones más reales donde haya temperaturas bajas, viento en contra o desnivel, haciendo que el vehículo eléctrico consuma más. Se ha visto en un video de Todos Eléctricos [40], en el cual demostraba un consumo medio de 26 kWh con una temperatura ambiente de -1°C y 300 metros de desnivel. Con ese consumo, en una vida útil de 250.000 km, se necesitarían 65 MWh. Los resultados se van a mostrar primero en el caso de renovables de EU y luego de USA.

6.4.1.1 Porcentaje de renovables de Europa (Véase Mix energético EU, 2022)

Impactos BEV vs ICEV

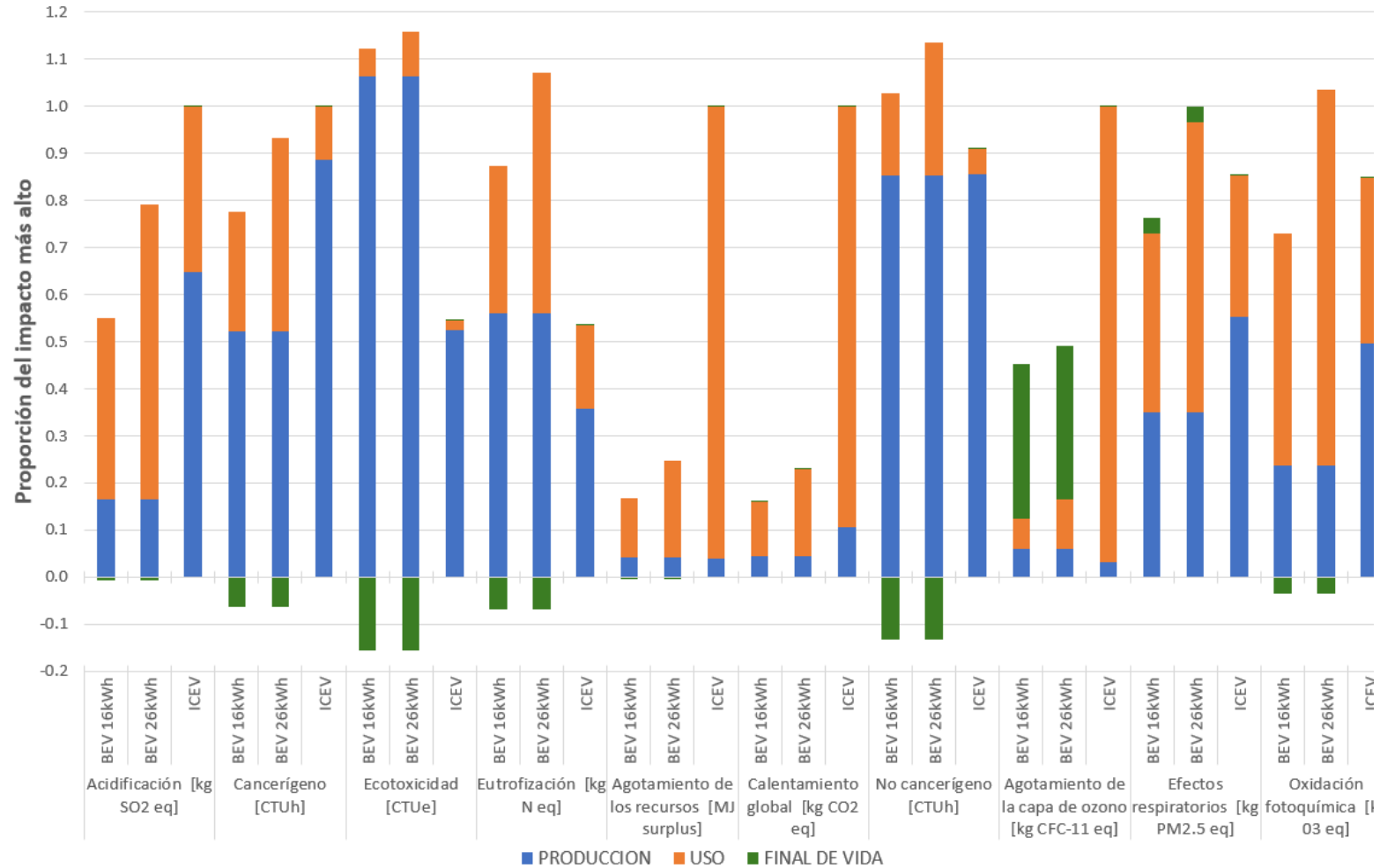


Figura 43: Análisis de sensibilidad en el consumo del BEV con un 38,39% de renovables

Con el objetivo de facilitar la visualización de los resultados en el análisis de sensibilidad se ha representado los datos del BEV con el consumo de 16 kWh y el de 26 kWh, además de los del ICEV. Los resultados muestran que un aumento del consumo de los BEV conlleva un incremento de las emisiones del 62,5% en la etapa de uso debido mayor consumo de electricidad.

Con estos nuevos datos, el BEV produce mayores emisiones de partículas en suspensión y, además, potencia más la formación de smog, superando al ICEV en estos dos impactos. En el caso de la ecotoxicidad y la eutrofización donde el BEV tenía impactos más elevados, la

diferencia ahora es todavía mayor con respecto al de combustión. Aún con este nuevo consumo, las emisiones de dióxido de carbono del ICEV son mucho mayores.

6.4.1.2 Porcentaje de renovables de USA (Véase Mix energético USA, 2023)

Impactos BEV vs ICEV

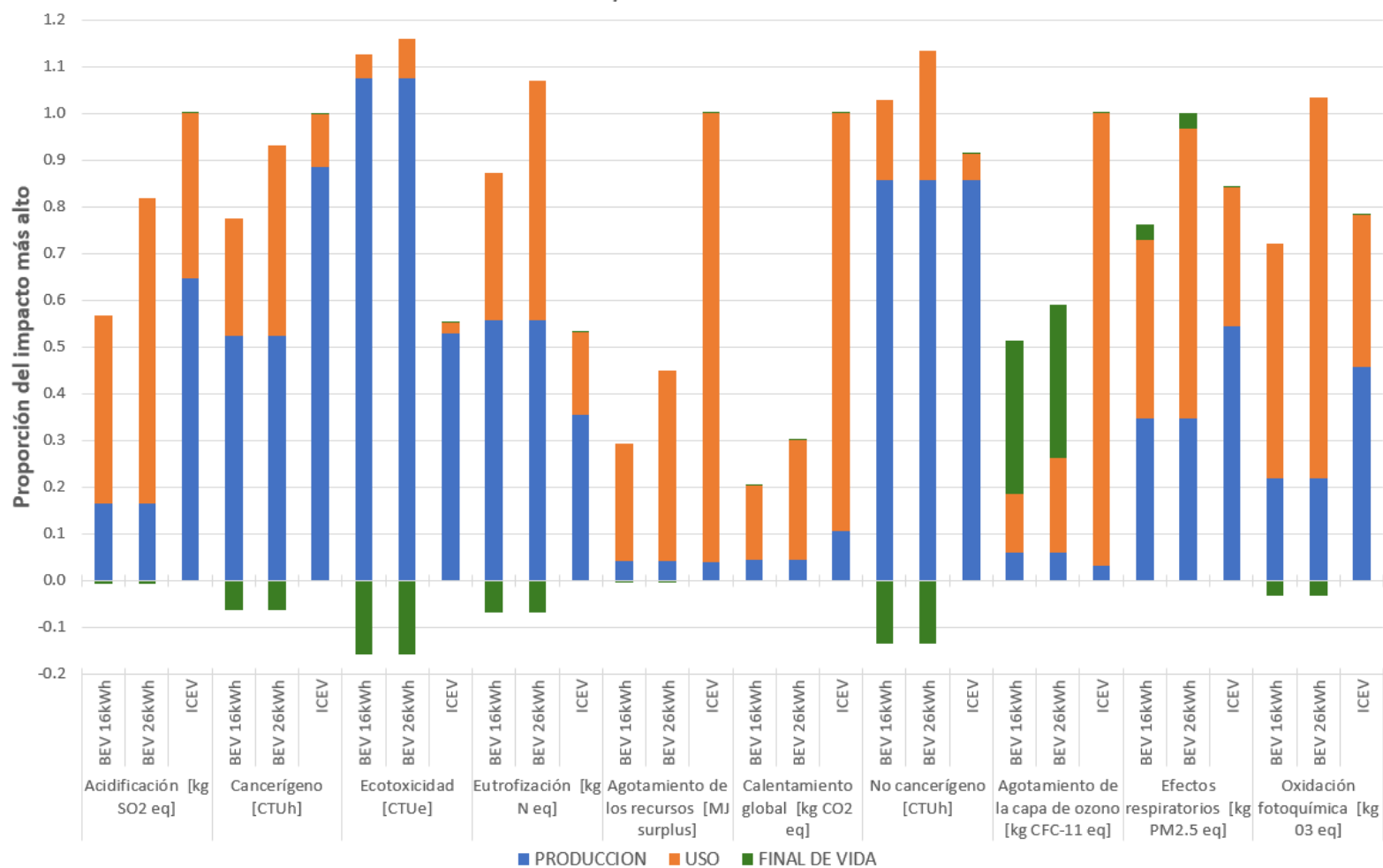


Figura 44: Análisis de sensibilidad en el consumo del BEV con un 21.4% de renovables

Con un porcentaje de renovables menor que el anterior, se obtiene que los impactos del BEV son aún todavía mayores por la procedencia de la energía extra necesaria del nuevo consumo.

6.4.2 CONSUMO L/100 KM

En este apartado se utilizará un consumo de 10 litros a los 100 km, por lo que se necesitarán 25.000 litros para completar los 250.000 km. Con ese valor los resultados son los siguientes:

Impactos BEV vs ICEV

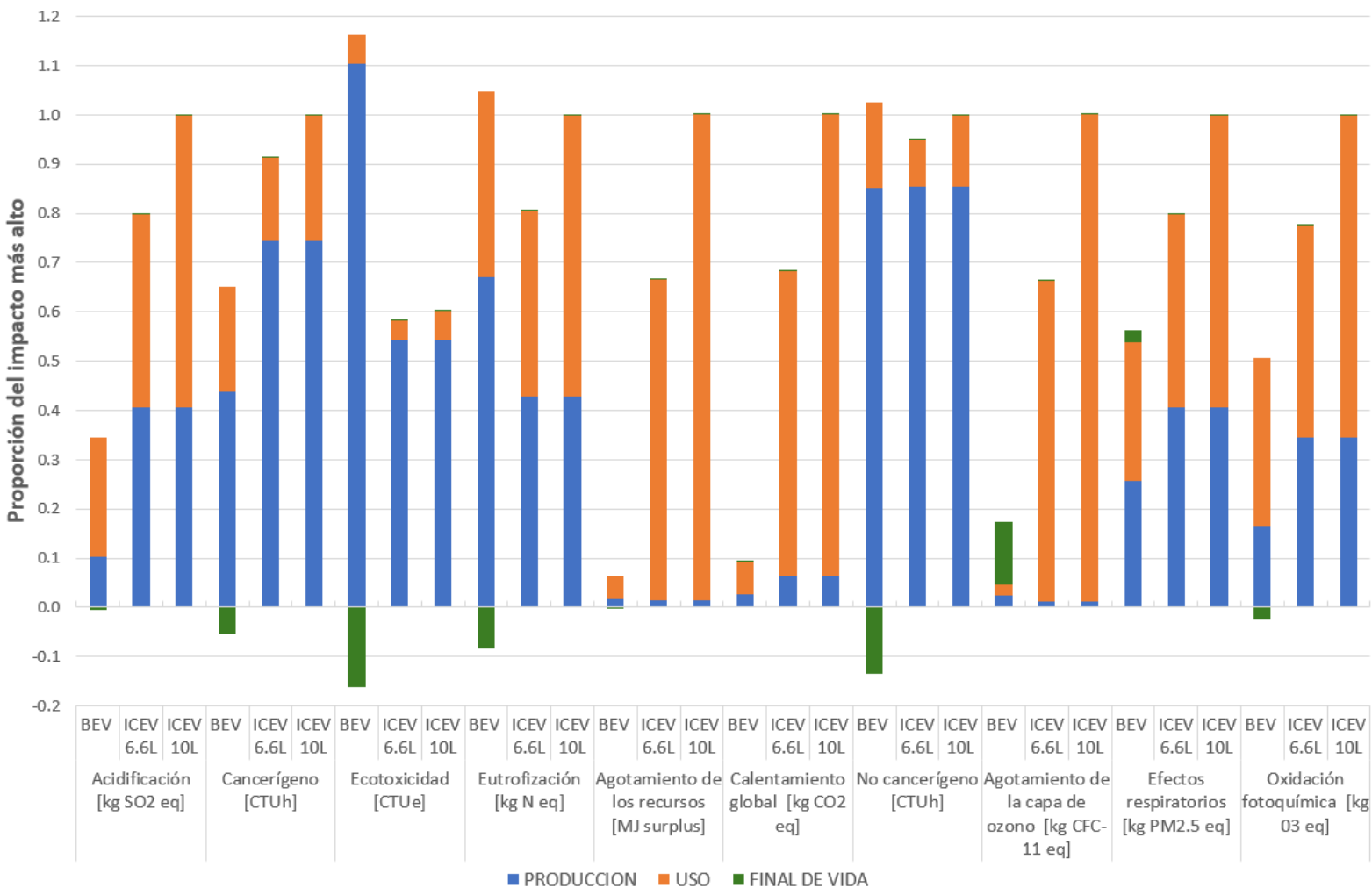


Figura 45: Análisis de sensibilidad del consumo del ICEV

Con este nuevo consumo de combustible y manteniendo el base del BEV, se obtiene que el ICEV tiene mayores emisiones en todas las categorías de impactos excepto en ecotoxicidad, la cual no se ve prácticamente afectada. La eutrofización y los carcinógenos sí se han visto incrementados de tal manera que has superado a los del BEV.

6.4.3 PORCENTAJE DE RENOVABLES

El porcentaje de renovables define los impactos medioambientales a la hora de cargar el vehículo eléctrico. A lo largo del proyecto se han tratado los porcentajes de USA y Europa, siendo del 21,4% y del 38,39%. Actualmente, los países están invirtiendo en energías renovables con el objetivo de aumentar la producción de energía limpia y reducir las emisiones al máximo posible. En cabeza se encuentran países como Noruega, donde la energía hidroeléctrica y la eólica representan más del 98% de la producción eléctrica. [41]. En la siguiente figura se muestran los porcentajes de energía renovable instalada en diferentes países:

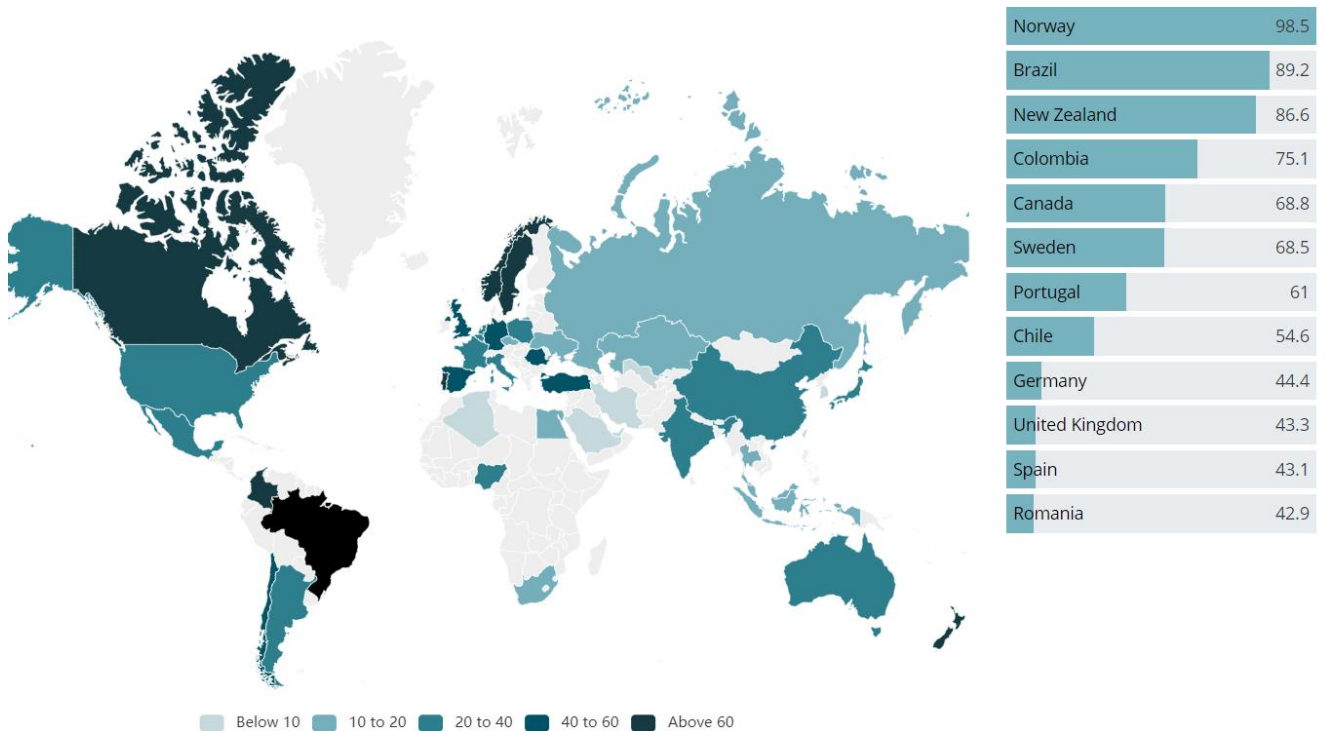


Figura 46: Cuota de las energías renovables en el mix energético mundial [42]

Analizando los países con mayores renovables se encuentra en común que su mayor fuente es la energía hidráulica. Se ha decidido modelar el caso de Noruega con el siguiente mix eléctrico:

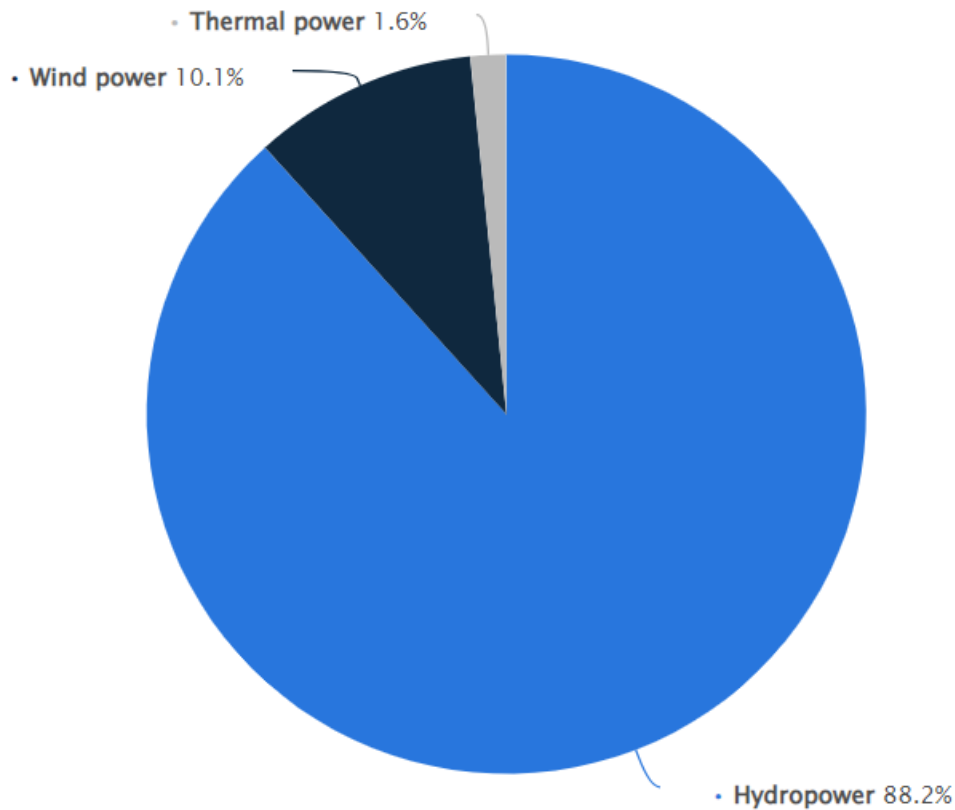


Figura 47: Distribución de la generación eléctrica de Noruega en 2022 [43]

En marzo de 2023 había casi 1.770 centrales hidroeléctricas en Noruega. La mayoría eran pequeñas o medianas-pequeñas. El tamaño más común es el de centrales medianas-pequeñas, con una capacidad de producción que oscila entre 1 y 10 MW. En cuanto a mayores potencias, había alrededor de 100 centrales con una capacidad superior a 100 MW.

Los resultados se muestran a continuación:

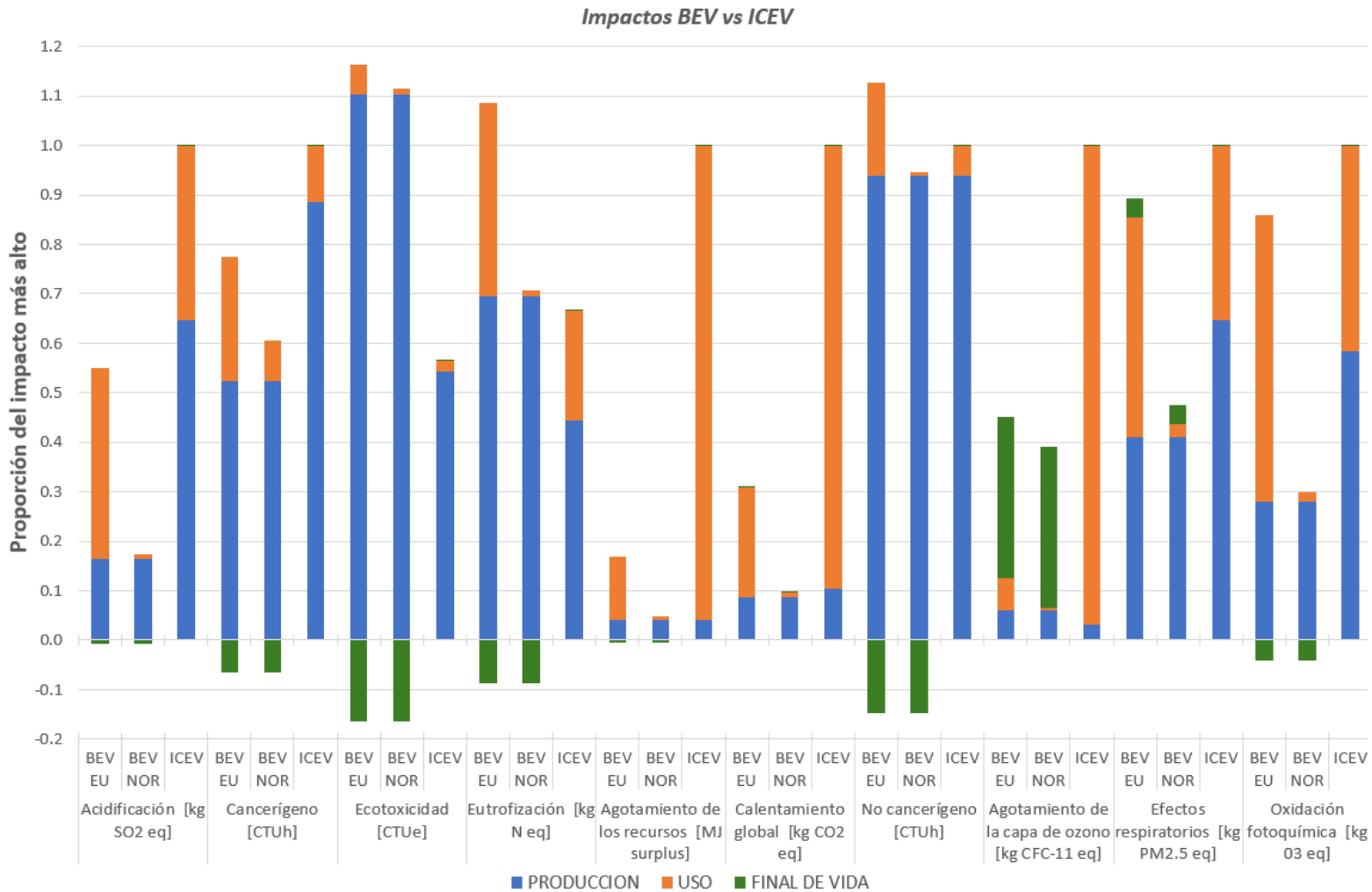


Figura 48: Análisis de sensibilidad del porcentaje de renovables

Como era de esperar, las emisiones causadas por la carga del BEV se ven drásticamente reducidas, demostrando que habría una gran diferencia si se consiguiera realizar la carga mediante energías limpias, en este caso mayoritariamente con energía hidráulica y, en menor medida, solar.

6.5 S-LCIA

La evaluación del ciclo de vida social (S-LCIA) es un método que se utiliza para evaluar los aspectos sociales y sociológicos de los productos, sus impactos reales y potenciales, tanto positivos como negativos, a lo largo de su ciclo de vida. Examina la extracción y transformación de materias primas, fabricación, distribución, uso, reutilización, mantenimiento, reciclado y eliminación final. El S-LCA utiliza datos genéricos y específicos de cada emplazamiento, puede ser cuantitativo, semicuantitativo o cualitativo, y complementa el LCA. [44]

La fabricación de ambas tecnologías genera diferentes impactos en la sociedad, para evaluar esos impactos se va a escoger entre las categorías de S-LCIA, que pueden encontrarse en el ANEXO II. Algunos de ellos estos impactos son los siguientes:

Tabla 13: Impactos sociales

IMPACTO SOCIAL	DESCRIPCION	CATEGORIA S-LCIA
Acceso a infraestructura	Se necesita una infraestructura de carga extensa y accesible para la adopción generalizada de BEVs. La falta de acceso a opciones de carga puede ser una barrera significativa, limitando a cierto porcentaje de la población a esta tecnología sostenible.	Equidad social
Creación de empleo	La transición a BEVs puede generar empleos en nuevas tecnologías y infraestructuras, como la fabricación de baterías y estaciones de carga. Para los ICEVs, mientras que la industria es más madura, las innovaciones en eficiencia también pueden sustentar empleo.	Empleo local

<p>Calidad del aire</p>	<p>Los BEVs reducen la contaminación del aire en áreas urbanas, que lleva a mejoras en la salud pública, reduciendo las enfermedades respiratorias y cardiovasculares en áreas urbanas..</p>	<p>Salud y seguridad</p>
<p>Respeto de los derechos rurales</p>	<p>La extracción de materias primas necesarias para la fabricación de baterías de BEVs, a menudo ocurre en áreas con poblaciones rurales. La explotación de estos recursos puede llevar a conflictos por el uso de la tierra y afectar negativamente a las culturas y economías locales.</p>	<p>Comunidad local</p>

6.6 CONCLUSIÓN

Para concluir el proyecto, se van a resumir los puntos clave basados en los resultados obtenidos:

- En términos generales, el BEV presenta menores impactos en la mayoría de las categorías evaluadas, particularmente en potencial de calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de recursos, mostrando solo el 30%, 45% y 18% de los impactos comparados con el ICEV, respectivamente.
- La producción de BEV tiene un impacto considerablemente mayor en categorías como eutrofización, no carcinogénicos y ecotoxicidad, debido principalmente a la fabricación de la batería. Sin embargo, en la etapa de uso y final de vida, considerando su reciclaje o segundo uso, el BEV tiende a ser más amigable con el medio ambiente.
- En cuanto a emisiones de CO₂, las generadas por el ICEV durante la etapa de uso son mucho mayores que las BEV, lo cual hace que, observando el ciclo de vida entero y teniendo en cuenta el reemplazo de batería, las emisiones de CO₂ de los BEV en Europa sean del 35,14% a los 250.000km. En un caso menos bueno, como es el de USA, las emisiones de CO₂ del BEV siguen representando un 44% del ICEV.
- Los resultados varían significativamente dependiendo del mix energético utilizado para la operación de los vehículos. En regiones con una alta proporción de energías renovables, el BEV presenta muchos menores impactos ambientales en comparación con el ICEV.

En resumen, mientras que los BEVs generalmente ofrecen ventajas en términos de impactos medioambientales, especialmente en etapas de uso y final de vida bajo ciertos mix energéticos, la producción de estos vehículos presenta nuevos retos e impactos sociales. La

fabricación de componentes como baterías es intensiva en recursos y conlleva impactos ambientales que no deben subestimarse. Estos resultados muestran la necesidad de mejorar las prácticas de producción y la infraestructura energética para maximizar los beneficios medioambientales de los vehículos eléctricos.

Capítulo 7. BIBLIOGRAPHY

- [1] «Gate,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/353046187_Manual_para_un_sistema_de_monitoreo_ambiental_participativo_que_mejore_la_capacidad_de_adaptacion_al_cambio_climatico_de_las_comunidades_pesqueras_y_acuicolas_en_Chile/figures?lo=1.
- [2] «Department of Toxic Substances Control,» [En línea]. Available: <https://dtsc.ca.gov/acute-aquatic-toxicity/>.
- [3] «Probiotic,» [En línea]. Available: <https://probiotic.com/2019/08/eutrophication-and-algae/>.
- [4] «Datum,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/360650127_Broadening_the_scope_of_on-site_detection_and_bioanalytical_perspective_of_toxic_elements_using_fluorescent_sensing_constructs/figures?lo=1.
- [5] «Geek,» [En línea]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/stratospheric-ozone-depletion-causes/>.
- [6] «Britannica,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/science/smog>.
- [7] G. D. ., P. V. Shrey Verma, «Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: a review,» *ELSEVIER*.

- [8] M. D. M. P. Francesco Del Peroa, «Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine and Electric Car».
- [9] R. D. a. C. A. Pete Poovanna, «Environmental Life Cycle Assessment of Electric Vehicles in Canada.».
- [10] A. A. M. R. X. L. Muhammad Shafique, «Life cycle assessment of electric vehicles and internal combustion engine vehicles: a case study of Hong Kong».
- [11] SCANIA, «Life cycle assessment of distribution vehicles».
- [12] [En línea]. Available: <https://www.iso.org/ics/13.020.60/x/>.
- [13] «Research Gate,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Phases-of-a-cradle-to-grave-Life-Cycle-Assessment-of-vehicles-Own-representation-based_fig1_353460423.
- [14] «Research Gate,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/EV-propulsion-and-control-systems-schematic-diagram_fig3_287579981.
- [15] «Power Electronics,» [En línea]. Available: <https://www.pwerelectronicsnews.com/driving-advanced-performance-solutions-for-evs/>.
- [16] «Research Gate,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/ICE-drivetrain-with-an-all-wheel-drive-with-obvious-complexity-1_fig1_333987256.
- [17] G. H. S. K. Craig Dun, «Improvements to the definition of lifetime mileage of light duty vehicles».

- [18] [En línea]. Available: <https://www.junkcarmedics.com/blog/how-long-vehicles-last-usa/>.
- [19] «EL PAIS,» [En línea]. Available: <https://motor.elpais.com/coches-electricos/los-10-coches-electricos-mas-vendidos-en-el-mundo-en-2022/>.
- [20] «Ecoinvent,» [En línea]. Available: <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.7>.
- [21] W. Auto. [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=OSL_9351568.
- [22] H. suhner. [En línea]. Available: <https://qas-ecatalog.hubersuhner.com/>.
- [23] «Motor Biscuit,» [En línea]. Available: edgeservices.bing.com/edgesvc/redirect?url=https%3A%2F%2Fwww.motorbiscuit.com%2F3-ways-heat-pumps-improve-electric-vehicle-ev-performance-efficiency-cold-weather%2F&hash=e12C3K7JltQV1x8hvI6N3nbbbfbaX1GqTPjudEV8IAk%3D&key=psc-underside&usparams=cvid%3A51D%.
- [24] M. L. Georg W. Schweimer, «Life Cycle Inventory for the Golf A4».
- [25] J. H. K. N. I. Mohammad Mosharraf Hossain, «Life cycle impacts of three-way ceramic honeycomb catalytic converter in terms of disability adjusted life year».
- [26] M. T. a. M. F. Erwin M. Schau*, «Life cycle approach to sustainability assessment: a case study of remanufactured alternators,» *ECONSTOR*.
- [27] J. C. L. Solaberrieta1*, «ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO L-2630 Y AlSi9Cu3».

- [28] «Lexus,» [En línea]. Available: <https://www.clubrsx.com/threads/how-much-does-the-ecu-weigh.377223/>.
- [29] E. Español. [En línea]. Available: https://www.elespanol.com/motor/20231009/probamos-volkswagen-id3-coche-electrico-consume-mechero/800420043_0.html#:~:text=De%20esta%20manera%2C%20la%20primera,medio%20de%2015%2C3%20kWh..
- [30] «U.S. Energy,» [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=427&t=3>.
- [31] «Statista,» [En línea]. Available: <https://www.statista.com/statistics/800217/eu-power-production-by-fuel/>.
- [32] «Sigrauto,» [En línea]. Available: <https://www.sigrauto.com/cuanto-se-recupera-de-vehiculos-fuera-de-uso>.
- [33] «Commission European,» [En línea]. Available: https://commission.europa.eu/about-european-commission/departments-and-executive-agencies/eurostat-european-statistics_es.
- [34] L. Z. a. M. Chen, «Research on Spent LiFePO₄ Electric Vehicle Battery Disposal and Its Life Cycle Inventory Collection in China,» *MDPI*.
- [35] M. Z. a. S. Schellenberger, «Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling - The Scope-lib process,» *RI.SE*.
- [36] *. L. G. J. S. a. M. Q. W. Jennifer B. Dunn, «Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries,» *ACS publications*, vol. Science and Technology.

- [37] A. K. G. H. K. Evangelos Kallitsi, «Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs,» *ELSEVIER*.
- [38] «National Institute of Environmental Health Sciences,» [En línea]. Available: <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/enfermedades/contaminacion#:~:text=Las%20emisiones%20de%20los%20veh%C3%ADculos,son%20las%20principales%20fuentes%20de.>
- [39] «Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico España,» [En línea]. Available: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/dioxido-azufre.html#:~:text=Este%20contaminante%20puede%20producir%2C%20inclu so,\)%2C%20sobre%20la%20biodiversidad%2C%20los.](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/dioxido-azufre.html#:~:text=Este%20contaminante%20puede%20producir%2C%20inclu so,)%2C%20sobre%20la%20biodiversidad%2C%20los.)
- [40] «Youtube,» [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=yGdFYM_qD_U&ab_channel=TodosEl%C3%A9ctricos.
- [41] «Statista,» [En línea]. Available: <https://www.statista.com/topics/9727/renewable-energy-in-norway/#editorsPicks.>
- [42] «Enerdata,» [En línea]. Available: <https://yearbook.enerdata.net/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html.>
- [43] «International Energy Agency,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/countries/norway/energy-mix.>
- [44] «Life Cycle Initiative,» [En línea]. Available: <https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/life-cycle-approaches/social-lca/.>

- [45] L. Cycle. [En línea]. Available: <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2009%20-%20Guidelines%20for%20sLCA%20-%20EN.pdf>.
- [46] «dfgfdg,» [En línea]. Available: <https://www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/europe#unit-sales>.
- [47] «sdsdsd,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/353046187_Manual_para_un_sistema_de_monitoreo_ambiental_participativo_que_mejore_la_capacidad_de_adaptacion_al_cambio_climatico_de_las_comunidades_pesqueras_y_acuicolas_en_Chile/figures?lo=1.

ANEXO I

ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Los objetivos de desarrollo sostenible son 17 metas diseñadas para conseguir un futuro sostenible para todo el mundo. Se crearon en el año 2015 por las Naciones Unidas y se pretenden cumplir para el año 2030. Están incluidos en la denominada Agenda 2030 de las Naciones Unidas.

Los 17 objetivos son los indicados a continuación:

- | | |
|---|---|
| 1. Fin de la pobreza | 9. Industria, innovación e infraestructura. |
| 2. Hambre cero. | 10. Reducción de las desigualdades. |
| 3. Salud y bienestar | 11. Ciudades y comunidades sostenibles. |
| 4. Educación de calidad. | 12. Ciudades y comunidades sostenibles. |
| 5. Igualdad de género. | 13. Acción por el clima. |
| 6. Agua limpia y saneamiento. | 14. Vida submarina. |
| 7. Energía asequible y no contaminante. | 15. Vida de ecosistemas terrestres. |
| 8. Energía asequible y no contaminante. | 16. Paz, justicia e instituciones sólidas. |
| | 17. Alianzas para lograr los objetivos comunes. |

Por tanto, los objetivos de desarrollo sostenible con los que más se alinea este proyecto son:

7. Energía asequible y no contaminante.

El objetivo número 7 invita a los gobiernos a comprometerse con el medio ambiente para la implementación de energías renovables y limpias, así como garantizar su acceso a todos los habitantes del mundo, incluyendo las zonas más desfavorecidas.

9. Industria, innovación e infraestructura.

El objetivo número 9 pretende incorporar políticas industriales centradas en la igualdad y en la sostenibilidad, proporcionando herramientas para facilitar nuevas actividades económicas.

11. Ciudades y comunidades sostenibles.

El objetivo número 11 busca que las ciudades sean inclusivas, seguras y sostenibles. Se busca garantizar el acceso a la vivienda, los servicios básicos y a sistemas de transporte sostenibles y asequibles. También se busca reducir el impacto ambiental tan negativo de las ciudades.

13. Acción por el clima.

El objetivo número 13 busca incorporar medidas relativas al cambio climático bajo el prisma político y económico, además de fortalecer la resiliencia ante los riesgos relacionados con el cambio climático y los diferentes desastres naturales a nivel mundial. También busca mejorar la educación y sensibilización en materias de cambio climático y medio ambiente.

ANEXO II

Tabla 14: Marco de las categorías del S-LCIA [45]

Stakeholder categories	Impact categories	Subcategories	Inv. indicators	Inventory data
Workers	Human rights			
Local community	Working conditions			
Society	Health and safety			
Consumers	Cultural heritage			
Value chain actors	Governance			
	Socio-economic repercussions			

Tabla 15: Subcategorías del S-LCIA [45]

Stakeholder categories	Subcategories
Stakeholder “worker”	<ul style="list-style-type: none"> Freedom of Association and Collective Bargaining Child Labour Fair Salary Working Hours Forced Labour Equal opportunities/Discrimination Health and Safety Social Benefits/Social Security
Stakeholder “consumer”	<ul style="list-style-type: none"> Health & Safety Feedback Mechanism Consumer Privacy Transparency End of life responsibility
Stakeholder “local community”	<ul style="list-style-type: none"> Access to material resources Access to immaterial resources Delocalization and Migration Cultural Heritage Safe & healthy living conditions Respect of indigenous rights Community engagement Local employment Secure living conditions
Stakeholder “society”	<ul style="list-style-type: none"> Public commitments to sustainability issues Contribution to economic development Prevention & mitigation of armed conflicts Technology development Corruption
Value chain actors* not including consumers	<ul style="list-style-type: none"> Fair competition Promoting social responsibility Supplier relationships Respect of intellectual property rights