



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**Estudio comparativo del impacto ambiental global de  
vehículos eléctricos de batería (EV) frente a los de pila de  
combustible de hidrógeno (FCV)**

Autor: Miguel Chocano de Evan

Director: Juan Norverto Moriño

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**Estudio comparativo del impacto ambiental global de vehículos eléctricos de batería  
(EV) frente a los de pila de combustible de hidrógeno (FCV)**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2023/24 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.: Miguel Chocano de Evan

Fecha: 25/ 08/ 24

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan Norverto Moriñigo Fecha: ...../ ...../ .....

**juan de  
norverto**

Firmado digitalmente  
por juan de norverto  
Fecha: 2024.08.28  
16:36:34 +02'00'





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**Estudio comparativo del impacto ambiental global de  
vehículos eléctricos de batería (EV) frente a los de pila de  
combustible de hidrógeno (FCV)**

Autor: Miguel Chocano de Evan

Director: Juan Norverto Moriño

Madrid



# **Agradecimientos**

Deseo expresar mi agradecimiento a mi familia y a mi director, Juan Norverto Moriño, por acompañar y ayudar en la elaboración de este proyecto.



# **ESTUDIO COMPARATIVO DEL IMPACTO AMBIENTAL GLOBAL DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS DE BATERÍA (EV) FRENTE A LOS DE PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO (FCV)**

**Autor: Chocano de Evan, Miguel.**

Director: Norberto Moriñigo, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Se ha elaborado un estudio del impacto ambiental del coche de hidrógeno y del coche eléctrico, siguiendo la metodología de ciclo de vida(LCA). Este estudio tiene como objetivo aportar información concluyente sobre las emisiones totales de las dos tecnologías más prometedoras para el relevo de los coches de combustión interna, con el objetivo de reducir la huella de carbono de la industria del automóvil.

**Palabras clave:** Hidrógeno, Coche eléctrico, Transición energética, Descarbonización, Emisiones CO<sub>2</sub>, Coche de hidrógeno, Fuel Cell, Pila de hidrógeno, LCA, hidrógeno verde, gases de efecto invernadero

### **1. Introducción**

El estudio se ha centrado en las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes de cada tecnología. Es la variable dentro del impacto ambiental más relevante, y la reducción de sus emisiones es fundamental en la mitigación del cambio climático. El objetivo de este proyecto es proporcionar un análisis detallado y preciso de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes de las dos tecnologías más prometedoras en la descarbonización de la industria del automóvil.

### **2. Definición del proyecto**

El trabajo se basa en un análisis de ciclo de vida de dos vehículos, uno con tecnología de pila de hidrógeno, el Hyundai Nexso, y otro vehículo eléctrico de la misma marca, el Hyundai Kona EV. En los resultados finales, se ha incluido la huella de carbono del coche eléctrico usando el mix eléctrico español, el coche de pila de hidrógeno usando hidrógeno verde y el coche de pila de hidrógeno usando hidrógeno producido por electrolisis con el mix eléctrico español

### 3. Descripción del modelo

El análisis del impacto Ambiental se divide en tres partes.

La primera parte se centra en la extracción de materias primas para la fabricación del vehículo. Se ha utilizado el software de LCA GaBi, para analizar el impacto ambiental de las materias primas utilizadas en los vehículos, sin incluir las baterías. El impacto de las materias primas usadas en las baterías se ha calculado con la información de *“Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles”* - Chris Yuan, Yelin Deng, Tonghui Li, Fan Yang [9].

La segunda parte se centra en el impacto ambiental de la fabricación de los vehículos, utilizando el informe *“Energy-Consumption and Carbon-Emission, Analysis of Vehicle and Component Manufacturing”* by J.L. Sullivan, A. Burnham, and M. Wang - Center for Transportation Research Energy Systems Division, Argonne National Laboratory [6], que especifica los gastos energéticos de cada proceso en la fabricación del coche. Estos consumos de energía se convierten en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes, usando el mix eléctrico del país de la fábrica, siendo Corea el país donde se fabrica el Hyundai Nexo y Republica Checa donde se fabrica el Hyundai Kona EV. Para la producción de la batería, se ha usado nuevamente el informe mencionado [9], para calcular la energía utilizada en el proceso. Esto se traslada a emisiones de CO<sub>2</sub> usando el mix eléctrico de Indonesia, país donde se fabrica la batería del Hyundai Kona EV.

La tercera parte se centra en las emisiones del uso del vehículo. Se ha elegido un uso en la vida de 160.000km, que es la garantía de la batería de Hyundai Kona EV. Para el coche eléctrico se calculan los kWh usados a partir de la hoja de características del fabricante, y se obtiene un valor de CO<sub>2</sub> emitido usando el mix eléctrico español. Para el vehículo de hidrógeno impulsado por hidrógeno verde, se han calculado las emisiones de compresión y distribución del hidrógeno, utilizando el mix eléctrico español, utilizando el siguiente informe *“JEC Well-to-Tank report v5”* – Joint Research Center – European comission [7]. Para el cálculo del vehículo de hidrógeno usando hidrógeno producido por electrolisis usando el mix eléctrico español, se ha calculado la energía total del hidrógeno usado en la vida del vehículo. Este valor se ha dividido por la eficiencia de la

electrolisis [12], para obtener un valor en kWh del consumo de energía de la red por parte del vehículo. Con este dato y conociendo las emisiones del mix eléctrico español, se calculan las emisiones de CO2 del vehículo, a las que se le añadirán las emisiones de compresión y distribución mencionadas anteriormente.

#### 4. Resultados

En este apartado se incluirán los resultados más importantes del estudio, que son las emisiones de CO2 equivalentes de cada tecnología.

Emisiones CO2 totales(kg)	Materias primas	Fabricación	Uso	Total
FCV Hidrógeno verde	4339	774	1006	6119
FCV Hidrógeno mix español	4339	774	17184	22297
EV	8182	6089	6115	20386

Tabla A – Emisiones de CO2 equivalentes de cada tecnología, diferenciando las etapas

En el siguiente gráfico se pueden ver las emisiones totales, diferenciando cada etapa y tecnología.

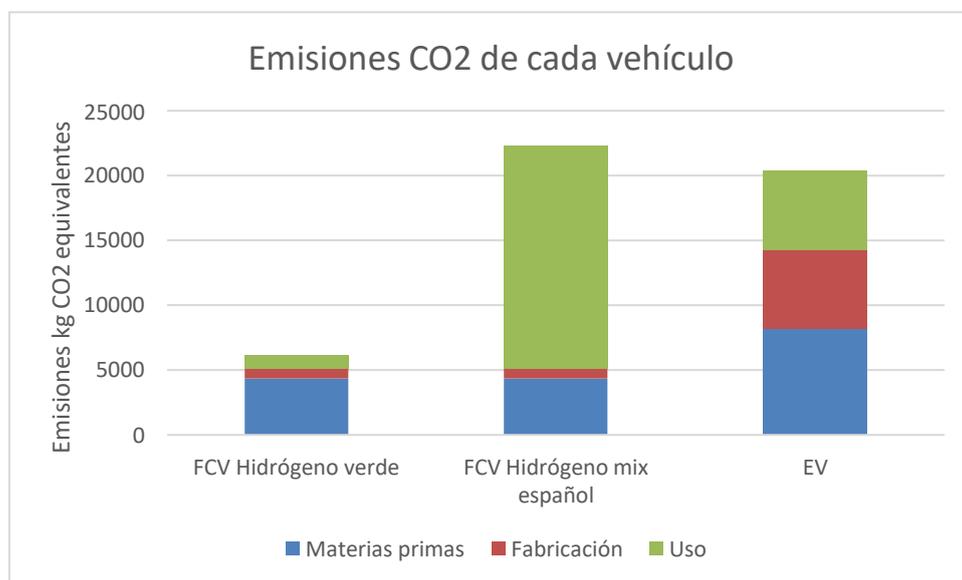


Ilustración A – Emisiones de CO2 equivalentes de cada tecnología, diferenciando las etapas

También se va a incluir las emisiones del vehículo eléctrico diferenciando la obtención de materias primas y producción de la batería, para visualizar la proporción

de impacto que tiene la batería en las emisiones del coche eléctrico, que es de un 45%.

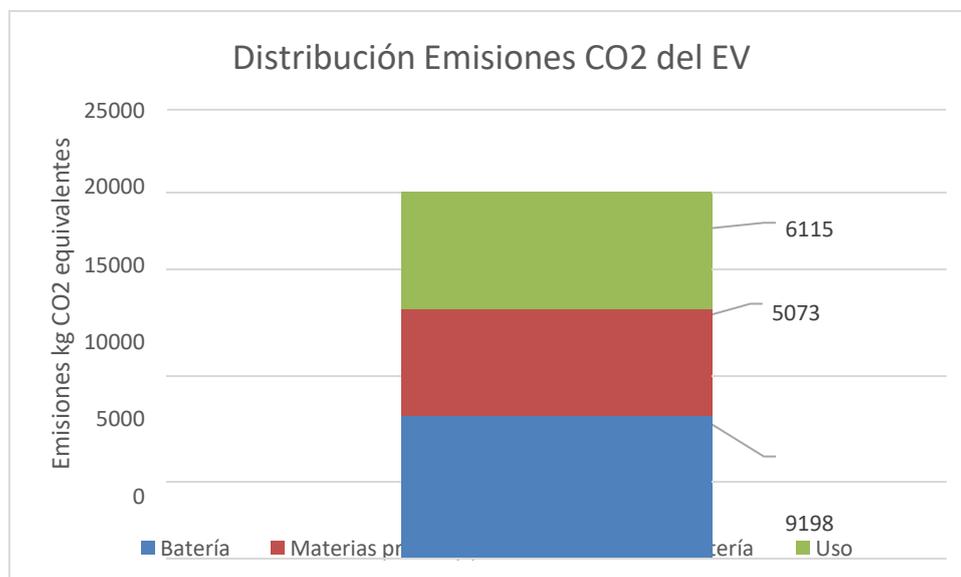


Figura B - Emisiones de CO2 del EV, diferenciando emisiones debidas a la batería, a las materias primas y producción del vehículo y al uso del vehículo

## 5. Conclusiones

En conclusión, los resultados indican que los vehículos de hidrógeno alimentados con hidrógeno verde son la opción más favorable en términos de emisiones de CO2, durante todo su ciclo de vida. Este resultado destaca el potencial del hidrógeno verde como una alternativa viable y sostenible para la movilidad futura, especialmente en la reducción de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, las emisiones de CO2 del coche de hidrógeno, utilizando hidrógeno producido con el mix energético español actual (22,297 kg) son muy similares a las del vehículo eléctrico, que genera aproximadamente 20,386 kg de CO2. Esto sugiere que, aunque ambas tecnologías ofrecen ventajas en comparación con los vehículos de combustión interna tradicionales, su impacto ambiental depende significativamente de la fuente de energía utilizada para la producción de hidrógeno y electricidad. Por lo tanto, para maximizar los beneficios ambientales de estas tecnologías, es crucial promover la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Además, es fundamental seguir mejorando las tecnologías de baterías de los vehículos eléctricos y buscar soluciones más eficientes desde el punto de vista energético. Se debe reducir la huella de carbono asociada a la obtención de materias primas y la fabricación de baterías, ya que estos procesos representan un 45% de las emisiones de CO<sub>2</sub> del ciclo de vida del Hyundai Kona EV, alcanzando los 9,198 kg de CO<sub>2</sub>, que superan las emisiones totales de un vehículo de hidrógeno que utiliza únicamente hidrógeno verde.

# COMPARATIVE STUDY OF THE GLOBAL ENVIRONMENTAL IMPACT OF BATTERY ELECTRIC VEHICLES (EV) AND HYDROGEN FUEL CELL VEHICLES (FCV)

**Author: Chocano, Miguel.**

Supervisor: Norverto Moriñigo, Juan.

Collaborating Entity: ICAI

## ABSTRACT

This study analyses the environmental impact of hydrogen and electric cars, following the life cycle assessment (LCA) methodology. This study aims to provide conclusive information on the total emissions of the two most promising technologies for replacing internal combustion engine vehicles, with the goal of reducing the carbon footprint of the automotive industry.

**Keywords:** Hydrogen, EV, Energy transition, Decarbonization, CO2 emissions, Hydrogen vehicle, Fuel Cell, LCA, Green hydrogen, Greenhouse gases

### 1. Introduction

The study focuses on the equivalent CO2 emissions of each technology. This is the most relevant variable within the environmental impact, and reducing these emissions is essential for mitigating climate change. The aim of this project is to provide a detailed and accurate analysis of the equivalent CO2 emissions of the two most promising technologies for decarbonizing the automotive industry.

### 2. Project definition

This project is based on a life cycle assessment (LCA) of two vehicles: one with hydrogen fuel cell technology, the Hyundai Nexo, and another electric vehicle from the same brand, the Hyundai Kona EV. The results include the carbon footprint of the electric vehicle using the Spanish electricity mix, the hydrogen fuel cell vehicle using green hydrogen, and the hydrogen fuel cell vehicle using hydrogen produced by electrolysis with the Spanish electricity mix.

### 3. Description of model

The environmental impact analysis is divided into three parts:

The first part focuses on the extraction of raw materials for the vehicle's manufacturing. The GaBi LCA software was used to analyse the environmental impact of the raw materials used in the vehicles, excluding the batteries. The impact of the raw materials used in the batteries was calculated using data from "Manufacturing Energy Analysis of Lithium-Ion Battery Pack for Electric Vehicles" by Chris Yuan, Yelin Deng, Tonghui Li, Fan Yang [9].

The second part focuses on the environmental impact of vehicle manufacturing, using the report "Energy Consumption and Carbon Emission Analysis of Vehicle and Component Manufacturing" by J.L. Sullivan, A. Burnham, and M. Wang - Center for Transportation Research Energy Systems Division, Argonne National Laboratory [6], which specifies the energy expenditures of each process in vehicle manufacturing. These energy consumptions are converted into equivalent CO<sub>2</sub> emissions using the electricity mix of the country where the factory is located, with South Korea being the country where the Hyundai Nexo is manufactured, and the Czech Republic where the Hyundai Kona EV is manufactured. For battery production, the previously mentioned report [9] was used again to calculate the energy used in the process. This energy consumption is translated into CO<sub>2</sub> emissions using the electricity mix of Indonesia, where the Hyundai Kona EV battery is produced.

The third part focuses on emissions during the vehicle's use phase. A lifetime usage of 160,000 km was chosen, which corresponds to the warranty period of the Hyundai Kona EV battery. For the electric vehicle, the kWh consumed was calculated from the manufacturer's specifications, and the CO<sub>2</sub> emitted was determined using the Spanish electricity mix. For the hydrogen vehicle powered by green hydrogen, the emissions from hydrogen compression and distribution were calculated using the Spanish electricity mix and the report "JEC Well-to-Tank report v5" – Joint Research Center – European Commission [7]. For the hydrogen vehicle using hydrogen produced by electrolysis with the Spanish electricity mix, the total energy of the hydrogen used over

the vehicle's lifetime was calculated, using manufacturer's specifications. This value was divided by the efficiency of electrolysis [12] to obtain a kWh value of the grid energy consumption by the vehicle. With this data and the CO<sub>2</sub> emissions of the Spanish electricity mix, the vehicle's CO<sub>2</sub> emissions were calculated, to which the compression and distribution emissions mentioned above were added.

#### 4. Results

This section presents the most important results of the study, which are the equivalent CO2 emissions of each technology.

Emisiones CO2 totales(kg)	Materias primas	Fabricación	Uso	Total
FCV Hidrógeno verde	4339	774	1006	6119
FCV Hidrógeno mix español	4339	774	17184	22297
EV	8182	6089	6115	20386

Table A – Equivalent CO2 emissions of each technology, broken down by stages

The following chart shows the total emissions, broken down by technology and stage.

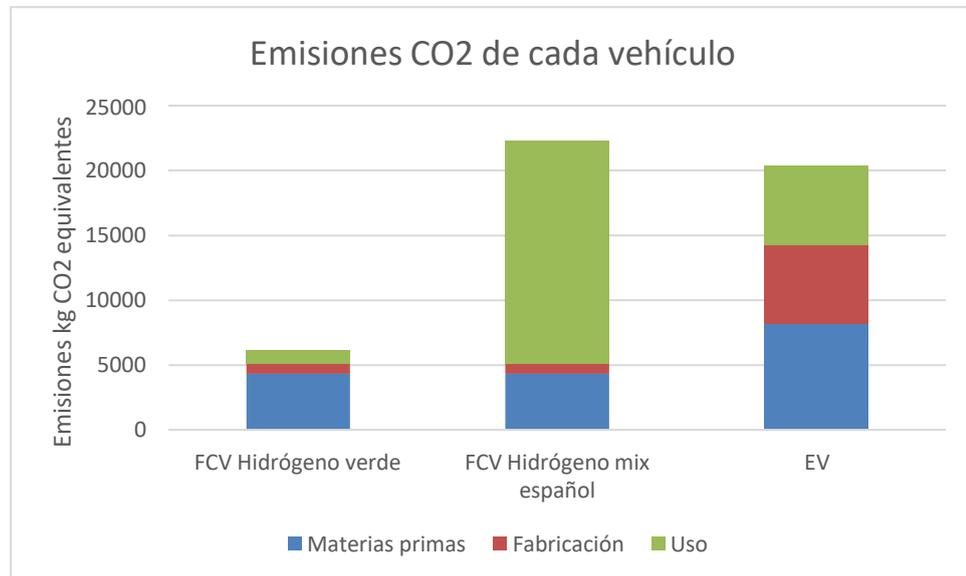


Ilustración A – Emisiones de CO2 equivalentes de cada tecnología, diferenciando las etapas

Additionally, the emissions of the electric vehicle will be presented separately, differentiating the emissions from raw materials and battery production to highlight

the proportion of impact that the battery has on the electric vehicle's emissions, which is 45%.

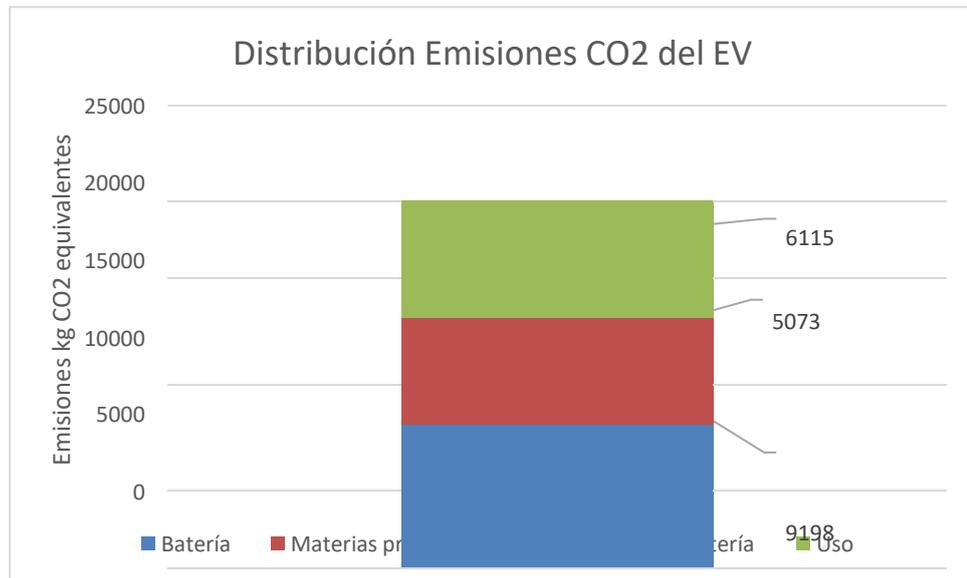


Figure B – CO2 emissions of the EV, differentiating emissions due to the battery, the raw materials, vehicle production, and vehicle use.

## 5. Conclusions

In conclusion, the results indicate that hydrogen vehicles powered by green hydrogen are the most favourable option in terms of CO2 emissions throughout their entire life cycle. This finding highlights the potential of green hydrogen as a viable and sustainable alternative for future mobility, particularly in reducing greenhouse gases.

On the other hand, the CO2 emissions of the hydrogen car using hydrogen produced with the current Spanish energy mix (22,297 kg) are very similar to those of the electric vehicle, which generates approximately 20,386 kg of CO2. This suggests that although both technologies offer advantages compared to traditional internal combustion vehicles, their environmental impact significantly depends on the energy source used for hydrogen and electricity production. Therefore, to maximize the environmental benefits of these technologies, it is crucial to promote the transition to cleaner and more sustainable energy sources.

Additionally, it is essential to continue improving electric vehicle battery technologies and seek more energy-efficient solutions. The carbon footprint associated with the extraction of raw materials and battery manufacturing must be reduced, as these processes account for 45% of the Hyundai Kona EV's life cycle CO<sub>2</sub> emissions, reaching 9,198 kg of CO<sub>2</sub>, which exceeds the total emissions of a hydrogen vehicle using only green hydrogen.

## *Índice de la memoria*

<b>1. Introducción.....</b>	<b>6</b>
1.1 Estado de la cuestión .....	6
1.2 Motivaciones .....	7
1.3 Objetivos .....	8
1.4 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	9
1.5 Metodología de trabajo y recursos a emplear .....	11
<b>Capítulo 2. Memoria.....</b>	<b>13</b>
2.1. Introducción a la memoria .....	13
2.1.1. Impacto ambiental.....	13
2.1.2. Transición a energías renovables.....	13
2.1.4. La Naturaleza de las Energías Renovables y los Desafíos de Almacenamiento .....	15
2.1.4. Hidrógeno Verde como Solución de Almacenamiento.....	16
<b>2.2 Tecnología e infraestructura FCEV .....</b>	<b>18</b>
2.2.1 Fuel cell.....	18
2.2.2 Producción de hidrógeno .....	19
2.2.3 Gasolineras de hidrógeno.....	22
<b>2.3. Tecnología e infraestructura EV.....</b>	<b>23</b>
2.3.1 Desarrollo de tecnología de baterías de litio .....	23
2.3.2 Estaciones de recarga en España.....	24
2.3.3 Importancia del mix de generación eléctrico .....	24
<b>2.5 LCI (INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA) FCEV.....</b>	<b>25</b>
2.1 2.5.1 Introducción.....	25
2.2 2.5.2 Materias primas en el FCV .....	26
2.5.3 Fabricación del FCV .....	30
2.5.4 Uso del FCV con hidrógeno verde.....	33
2.5.5 Uso del FCV con hidrógeno producido con el mix eléctrico español.....	34
<b>2.6 LCI (INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA) EV .....</b>	<b>36</b>
2.6.1 Introducción .....	36

2.6.2 Materias primas.....	36
2.6.3 Fabricación.....	39
2.6.4 Uso del vehículo eléctrico.....	43
<b>2.7 EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL CICLO DE VIDA.....</b>	<b>44</b>
<b>2.8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>47</b>
<b>3. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>49</b>
<b>4. ANEXOS 50</b>	
<i>Otros impactos ambientales de la obtención de las materias primas del FCV, Hyundai Nexo</i> .....	50
<i>Otros impactos ambientales de la obtención de las materias primas del FCV, Hyundai Nexo.</i> .....	54

## Índice de figuras

Figura 1, Funcionamiento Fuel Cell, <a href="https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2020-10-hydrogen-fuel-cells-explained">https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2020-10-hydrogen-fuel-cells-explained</a> .....	19
Figura 2, Obtención de hidrógeno gris/azul, <a href="https://broadleaf.com.au/resource-material/the-colour-of-hydrogen/">https://broadleaf.com.au/resource-material/the-colour-of-hydrogen/</a> .....	20
Figura 3, Mapa gasolineras de hidrógeno España y Portugal, <a href="https://gasnam.es/mapa-estaciones-gas-natural-hidrogeno/">https://gasnam.es/mapa-estaciones-gas-natural-hidrogeno/</a> .....	22
Figura 4, Evolución precio baterías de litio, <a href="https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/">https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/</a> .....	23
Figura 5, distribución de peso en el FCV, [1].....	27
Figura 6, Emisiones de las materias primas del FCV, elaboración propia .....	29
Figura 7, Distribuciones emisiones kg CO2 por materia prima FCV, elaboración propia..	30
Figura 8, Porcentaje de proceso en cada materia prima, [6].....	31
Figura 9, Consumo en MJ de cada proceso en la fabricación del FCV, elaboración propia	33
Figura 10, Distribución de emisiones de CO2 del FCV, diferenciando emisiones del mix energético y emisiones de la compresión y distribución, elaboración propia .....	35
Figure 11, distribución de peso en el EV, [1] .....	37
Figura 12, Emisiones de las materias primas del EV, elaboración propia .....	38
Figure 13, Distribuciones emisiones kg CO2 por materia prima EV, elaboración propia	39
Figura 14, Consumo en MJ de cada proceso en la fabricación del FCV, elaboración propia .....	40
Figura 15, Emisiones de cada proceso en la producción de la batería [9].....	41

Figura 16, emisiones de CO2 del EV, diferenciando batería y el resto del vehículo, elaboración propia .....	42
Figura 17, Emisiones de CO2 de cada vehículo, diferenciando entre fases del ciclo de vida, elaboración propia .....	44
Figura 18, Emisiones de CO2 del EV, diferenciando emisiones debidas a la batería, a las materias primas y producción del vehículo y al uso del vehículo, elaboración propia	45
Figura 19, Proporción emisiones de CO2 del EV, diferenciando emisiones debidas a la batería, a las materias primas y producción del vehículo y al uso del vehículo, elaboración propia .....	46

## *Índice de tablas*

Tabla 1, % en peso por componente del FCV[1].....	26
Tabla 2, Pesos Hyundai Nexo, elaboración propia.....	27
Tabla 3, componente y proceso del FCV, elaboración propia.....	32
Tabla 4, Consumo de energía de cada proceso [6] .....	32
Tabla 5, distribución peso Hyundai Kona EV sin batería, elaboración propia.....	36
Tabla 6, consumos de energía por proceso, [6] .....	40
Tabla 7, emisiones totales (kg CO <sub>2</sub> ) por tecnología y procedencia de la energía, elaboración propia.....	44

# 1. INTRODUCCIÓN

## *1.1 ESTADO DE LA CUESTIÓN*

En la última década, tanto los EV como los FCEV han experimentado avances significativos en tecnología y adopción, aunque cada uno a un ritmo distinto.

Los EV han visto una notable mejora en la tecnología de baterías, particularmente en términos de densidad energética, coste y tiempos de recarga. La reducción del coste de las baterías de ion-litio ha sido crucial para hacer los EV más accesibles y competitivos en el mercado. Estas mejoras han permitido mayores autonomías y han reducido significativamente los tiempos de recarga. Los FCEV también han avanzado, aunque a un ritmo más lento. Las mejoras se han centrado en la eficiencia y durabilidad de las pilas de combustible, así como en la reducción de costes y la mejora de la infraestructura de distribución de hidrógeno.

En el mercado, la adopción de los EV ha crecido exponencialmente con un crecimiento anual compuesto de alrededor del 60%. Este crecimiento ha sido impulsado por políticas favorables y subsidios gubernamentales, especialmente en China y Europa. En 2023 se vendieron 14 millones de vehículos eléctricos. Fabricantes como Tesla, Nissan y Volkswagen han liderado el mercado, ofreciendo una variedad de modelos que han cambiado la percepción pública de los EV. La adopción de FCEV ha sido más limitada. En 2023 se han vendido 14 mil unidades de estos vehículos, con Japón y Corea del Sur a la vanguardia. Estos países han implementado estrategias nacionales para promover el uso del hidrógeno como fuente de energía limpia, incluyendo subsidios y proyectos de infraestructura. Empresas como Toyota, Hyundai y Honda han lanzado modelos comerciales de FCEV, como el Toyota Mirai y el Hyundai Nexu, aunque la infraestructura de hidrógeno sigue siendo limitada en comparación con los puntos de carga para EV.

En temas de innovación, los fabricantes de EV han introducido una amplia gama de modelos para diferentes segmentos del mercado, desde vehículos económicos hasta coches de lujo. Tesla ha sido especialmente influyente, no solo en la tecnología de baterías y vehículos, sino también en el desarrollo de una extensa red de carga rápida. Los FCEV han avanzado a través de importantes inversiones en tecnología y proyectos de infraestructura. Toyota, Hyundai y Honda han sido pioneros en la comercialización de FCEV y están colaborando con gobiernos y otras empresas para construir estaciones de hidrógeno y desarrollar tecnologías de producción de hidrógeno más sostenibles.

Antes de la realización de este TFG antes se han estudiado los siguientes informes:

“Batteries or hydrogen or both for grid electricity storage upon full electrification of 145 countries with wind-water-solar?” - iScience

“Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions” - ICCT

“Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car” Francesco Del Pero, Massimo Delogu, Marco Pierini

“Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en un vehículo eléctrico con freno regenerativo” - Juan Ignacio Montemayor Gorostiza

“JEC Well-to-Tank report v5” – European commission JRC

“Hydrogen Economy: Supply Chain, Life Cycle Analysis and Energy Transition” - Antonio Scipioni, Alessandro Manzardo, Jingzheng Ren

## **1.2 MOTIVACIONES**

La motivación de escoger este TFG surge de combinar mi interés sobre la ingeniería con mi compromiso por la sostenibilidad. Estudiar ingeniería me ha permitido profundizar en el

conocimiento de cómo se diseñan y desarrollan soluciones técnicas para los desafíos cotidianos y globales. Creo firmemente que la ingeniería sirve para mejorar la vida de las personas, proporcionando soluciones eficientes y efectivas a problemas complejos.

La descarbonización del sector del transporte, uno de los mayores emisores de gases de efecto invernadero, es un desafío crucial en este contexto. Estoy convencido de que cada paso hacia un futuro más limpio y sostenible cuenta, y quiero contribuir activamente a esta transición. La posibilidad de reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles y minimizar el impacto ambiental de nuestras actividades diarias es lo que motiva mi enfoque en soluciones sostenibles dentro de la ingeniería.

Este TFG representa la confluencia perfecta entre aplicar conceptos aprendidos en la carrera y la sostenibilidad como interés personal. Al analizar y comparar las dos tecnologías más importantes para descarbonizar el sector del transporte, los EV y los FCEV, tengo la oportunidad de explorar soluciones innovadoras que podrían tener un impacto significativo en la lucha contra el cambio climático. Este proyecto no solo me permitirá aplicar mis conocimientos técnicos y habilidades analíticas adquiridas durante mis estudios, sino que también me dará la oportunidad de contribuir a un área de investigación que tiene el potencial de mejorar la vida de las personas y proteger el planeta.

### **1.3 OBJETIVOS**

-Evaluar el Impacto Ambiental de los EV y los FCEV a lo Largo de su Ciclo de Vida

El primer objetivo es realizar una evaluación exhaustiva del impacto ambiental de los EV y FCEV considerando todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas, fabricación, uso y disposición final. Este análisis permitirá identificar y comparar las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes asociados con cada tecnología. La metodología de Análisis del Ciclo de Vida (LCA) será fundamental para cuantificar y comparar estos impactos, proporcionando una base científica sólida para determinar cuál de estas tecnologías es más sostenible en términos de huella ecológica.

-Evaluar la Infraestructura de los EV y FCEV

Este objetivo se centra en examinar la infraestructura necesaria para la adopción masiva de EV y FCEV, incluyendo estaciones de carga eléctrica y estaciones de hidrógeno. La disponibilidad, accesibilidad y costes de desarrollo de esta infraestructura son factores críticos para la aceptación y éxito de ambas tecnologías.

-Proporcionar Recomendaciones para Políticas y Estrategias Empresariales para promover la Adopción de EV y FCEV

Basado en los hallazgos de los análisis anteriores, este TFG busca desarrollar recomendaciones concretas para políticas gubernamentales y estrategias empresariales que puedan acelerar la adopción de tecnologías más sostenibles en el sector del transporte. Estas recomendaciones incluirán sugerencias sobre incentivos financieros, programas de desarrollo de infraestructura, campañas de concienciación pública, y colaboraciones público-privadas. El objetivo es ofrecer un conjunto de acciones prácticas que puedan ser implementadas para apoyar la transición hacia un transporte más limpio y eficiente.

## ***1.4 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)***

A continuación, se detalla cómo este TFG contribuye a los ODS específicos:

ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante

Meta 7.2: Aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas

El TFG explora las tecnologías EV y FCEV, ambas de las cuales pueden funcionar utilizando fuentes de energía renovable. Los EV pueden cargarse con electricidad generada a partir de energías renovables como la solar y la eólica, mientras que el hidrógeno para los FCEV puede producirse mediante electrólisis utilizando energía renovable. Este análisis contribuirá a entender mejor cómo estas tecnologías pueden integrar y potenciar el uso de energías limpias.

#### ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura

Meta 9.4: Modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas.

El TFG se centra en la evaluación y comparación de dos tecnologías emergentes en el sector del transporte, proporcionando un análisis detallado de sus infraestructuras de soporte. Al identificar las mejores prácticas y los desafíos asociados con la implementación de infraestructuras de carga eléctrica y de hidrógeno, este trabajo puede ofrecer recomendaciones para modernizar y mejorar la infraestructura de transporte de manera sostenible.

#### ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles

Meta 11.6: Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo

El transporte es una fuente importante de contaminación del aire en las ciudades. Este TFG analiza cómo los EV y FCEV pueden contribuir a reducir las emisiones de gases contaminantes y mejorar la calidad del aire urbano. Al proporcionar un análisis comparativo

del impacto ambiental de estas tecnologías, este trabajo puede ayudar a las ciudades a adoptar soluciones de transporte más limpias y sostenibles.

#### ODS 12: Producción y Consumo Responsables

Meta 12.2: Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.

El TFG incluye un análisis del ciclo de vida de los EV y FCEV, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. Este enfoque ayuda a identificar las prácticas más sostenibles en la producción teniendo en cuenta todo el proceso de fabricación y reciclaje

#### ODS 13: Acción por el Clima

Meta 13.2: Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.

Al evaluar y comparar las emisiones de gases de efecto invernadero de los EV y FCEV, este TFG proporciona datos críticos que pueden informar políticas y estrategias nacionales de transporte y energía. Las recomendaciones basadas en este análisis pueden ayudar a los responsables de la toma de decisiones a implementar tecnologías de transporte que apoyen los objetivos de mitigación del cambio climático.

## ***1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO Y RECURSOS A EMPLEAR***

Para garantizar la comparabilidad, y por tanto el valor, del análisis de ciclo de vida (LCA) existen en España las normas ISO 14040 e ISO 14044.[13]

En este TFG, se ha utilizado el software GaBi para realizar un análisis de ciclo de vida detallado y exhaustivo de las distintas tecnologías de vehículos evaluadas, FCV y EV. GaBi es una herramienta avanzada de modelado y simulación que permite analizar y cuantificar

una amplia gama de impactos ambientales, centrándose específicamente en las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas durante todo el ciclo de vida de un producto. A través de esta plataforma, se han podido desglosar y evaluar minuciosamente tanto las emisiones directas, como aquellas liberadas durante el uso del vehículo, como las emisiones indirectas, que incluyen procesos previos y posteriores a la fase de uso, proporcionando una visión completa del impacto ambiental total de cada tecnología. Para el estudio se ha utilizado la base de datos educativa que proporciona GaBi.

# MEMORIA

## ***2.1. INTRODUCCIÓN A LA MEMORIA***

### ***2.1.1. IMPACTO AMBIENTAL***

El TFG se centrará en el análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub>, abordando su origen, impacto y métodos para su reducción en diversos procesos industriales. Las emisiones de CO<sub>2</sub> son un componente clave en la evaluación del cambio climático y representan uno de los mayores desafíos ambientales de nuestra era debido a su contribución al efecto invernadero y al calentamiento global. Por esta razón, el estudio se focalizará en identificar y evaluar estrategias de mitigación para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en diferentes sectores económicos.

Sin embargo, se incluirán otros impactos ambientales en los anexos, relacionados con la extracción de materias primas, como la acidificación potencial, la reducción de la capa de ozono, la eutrofización, la toxicidad del agua dulce y la toxicidad humana. Es importante destacar que estos impactos solo considerarán las etapas de extracción de materias primas y no incluirán los efectos derivados de la producción, uso o disposición de baterías. Esto es debido a que estos datos provienen del software LCA GaBi. De esta manera, el TFG proporcionará un enfoque integral que, si bien se centra en el CO<sub>2</sub>, también considera otros aspectos ambientales relevantes asociados con los procesos industriales.

### ***2.1.2. TRANSICIÓN A ENERGÍAS RENOVABLES***

En la búsqueda de alternativas sostenibles a los vehículos de combustión interna, los coches eléctricos y los coches de hidrógeno se presentan como dos de las opciones más prometedoras. Ambos tipos de vehículos tienen el potencial de reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a lo largo de su ciclo de vida. Sin embargo, es esencial realizar un análisis de ciclo de vida (LCA) para comprender las

implicaciones ambientales completas de cada tecnología. Este análisis abarcará desde la obtención de las materias primas, seguido por la producción del vehículo, su uso y mantenimiento, y finalmente con el fin de vida del vehículo y su reciclaje. En este TFG se analizarán los impactos del coche eléctrico que utiliza un mix de energía español, en el cual se incluye la energía nuclear como una fuente renovable, y del coche de hidrógeno que funciona exclusivamente con hidrógeno verde.

El coche eléctrico es impulsado por baterías recargables que obtienen su energía del mix de electricidad disponible en una región específica. En este TFG se usará el mix de España, que es una combinación de diversas fuentes de energía que incluye renovables (como la eólica, solar, hidráulica y nuclear) y no renovables (como el gas natural y el carbón). Esto implica que el coche eléctrico no está completamente libre de emisiones indirectas. La energía fósil utilizada en la generación de electricidad resulta en emisiones de CO<sub>2</sub> que, aunque menores que las de un motor de combustión interna tradicional, siguen siendo un factor significativo en el ciclo de vida del coche eléctrico.

Uno de los puntos fuertes del coche eléctrico es su alta eficiencia energética. Aproximadamente el 70-80% de la electricidad que se almacena en la batería se convierte en energía mecánica útil para mover el vehículo. Esto significa que, aunque haya emisiones asociadas a la producción de la electricidad, la eficiencia del uso de esa energía en el coche eléctrico es relativamente alta, reduciendo las emisiones por kilómetro recorrido. Además, la capacidad de cargar los vehículos durante las horas de menor demanda permite una mayor integración de fuentes renovables en el mix energético.

El coche de hidrógeno utiliza una celda de combustible para convertir el hidrógeno en electricidad, que luego impulsa un motor eléctrico. Sin embargo, la eficiencia de la celda de combustible suele ser del 40-60%, lo que significa que gran parte de la energía contenida en el hidrógeno se pierde durante la conversión. Sumado a las pérdidas en la electrólisis, la

eficiencia total desde la electricidad inicial hasta la energía mecánica en las ruedas se reduce considerablemente, lo que impacta en la competitividad del hidrógeno verde frente a las baterías eléctricas, al menos en términos de eficiencia energética.

En total, la eficiencia de los FCEV está en torno a un 30-40% de eficiencia desde la energía eléctrica de la red a energía mecánica. Por estas diferencias en la eficiencia de cada tecnología, se plantea hacer la comparación usando EV con una producción de energía con el mix español, y los FCEV con hidrógeno verde. A pesar de que la tecnología de hidrógeno tenga menor eficiencia, presenta otras ventajas que se comentaran a continuación y que razona la elección del hidrógeno verde como único suministro a los FCEV.

El crecimiento de las energías renovables en el mix energético español ha llevado a una serie de desafíos y oportunidades en la gestión de la red eléctrica. A medida que la proporción de energías renovables como la eólica y la solar aumenta, la variabilidad y la intermitencia inherente a estas fuentes de energía se convierten en factores críticos que deben ser gestionados de manera efectiva para mantener la estabilidad y eficiencia de la red eléctrica. Aquí es donde el hidrógeno verde, producido mediante electrólisis alimentada por energías renovables, puede jugar un papel clave como solución para gestionar los picos de producción de energía renovable y como un complemento a los coches eléctricos en la transición hacia un transporte sostenible.

#### ***2.1.4. LA NATURALEZA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES Y LOS DESAFÍOS DE ALMACENAMIENTO***

Las fuentes de energía renovable como la solar y la eólica son intermitentes por naturaleza. Esto significa que la producción de energía no es constante y depende de factores ambientales como la irradiación solar y la velocidad del viento, que varían a lo largo del día y de las estaciones. Como resultado, hay momentos en los que la producción de energía

renovable supera la demanda, creando un exceso de electricidad en la red, lo que puede llevar a problemas de estabilidad si no se gestiona adecuadamente.

Actualmente, las soluciones de almacenamiento de energía, como las baterías y las plantas hidroeléctricas de bombeo, están limitadas por su capacidad y costes. Las baterías, aunque efectivas para el almacenamiento a corto plazo y la estabilización de la red, tienen limitaciones en términos de capacidad, vida útil, y sostenibilidad de los materiales. Las plantas hidroeléctricas de bombeo, aunque más eficientes para almacenamiento a gran escala, dependen de la geografía y no siempre son viables.

#### ***2.1.4. HIDRÓGENO VERDE COMO SOLUCIÓN DE ALMACENAMIENTO***

Mediante el proceso de electrólisis, la energía eléctrica se utiliza para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. Este hidrógeno puede ser almacenado indefinidamente y utilizado posteriormente como fuente de energía, ya sea para generar electricidad en momentos de alta demanda o como combustible en diversas aplicaciones, incluyendo el transporte.

Una de las ventajas más destacadas del hidrógeno es su capacidad para absorber grandes cantidades de energía cuando la producción renovable es alta y la demanda es baja. Esto no solo ayuda a evitar el desperdicio de energía renovable, sino que también contribuye a equilibrar la red eléctrica, proporcionando una alternativa viable al corte de producción de fuentes renovables cuando no pueden integrarse en la red.

El hidrógeno producido a partir de estos excedentes de energía renovable puede ser utilizado como combustible para vehículos de celda de hidrógeno. Además, a diferencia de los coches eléctricos, que requieren estar conectados a la red en momentos específicos para aprovechar la energía renovable disponible, la producción de hidrógeno puede realizarse de manera

continua siempre que haya un excedente de energía. Esto significa que las plantas de producción de hidrógeno pueden operar en momentos de baja demanda eléctrica o durante picos de producción renovable, maximizando el uso de la infraestructura de generación renovable.

La integración de hidrógeno verde en el mix energético no solo beneficia al sector del transporte, sino que también puede desempeñar un papel fundamental en la creación de un sistema energético más flexible y resiliente. En lugar de depender únicamente de las baterías y la infraestructura de almacenamiento de energía de corta duración, el hidrógeno puede actuar como una forma de almacenamiento de energía de largo plazo, equilibrando las fluctuaciones estacionales en la producción de energía renovable.

Además, el hidrógeno tiene el potencial de ser transportado y distribuido a través de redes de gas existentes, lo que amplía su alcance más allá de la infraestructura de la red eléctrica y facilita su uso en sectores industriales y domésticos. Este uso multifacético del hidrógeno convierte a esta tecnología en un componente clave de un sistema energético diversificado y adaptable.

En conclusión, el contexto del transporte, el hidrógeno puede complementar a los coches eléctricos a batería, proporcionando una alternativa que aprovecha la energía renovable que de otro modo se desperdiciaría. A medida que la transición hacia un mix energético más limpio continúa, la integración del hidrógeno verde podría ser una pieza clave para lograr un sistema energético equilibrado y resiliente, capaz de satisfacer las demandas de energía de una sociedad moderna sin comprometer los objetivos de sostenibilidad.

## **2.2 TECNOLOGÍA E INFRAESTRUCTURA FCEV**

### ***2.2.1 FUEL CELL***

La fuel cell del vehículo de hidrógeno mezcla el hidrógeno del tanque de combustible con el oxígeno del aire para crear electricidad y agua. Esta tecnología no presenta emisiones de CO<sub>2</sub> ya que el único producto emitido es vapor de agua. En la siguiente imagen se muestra el proceso de creación de energía a partir del hidrógeno y del oxígeno. Esta tecnología presenta una eficiencia de hasta el 60%, que es la que Hyundai afirma tener en su vehículo Hyundai Nexó. [3]

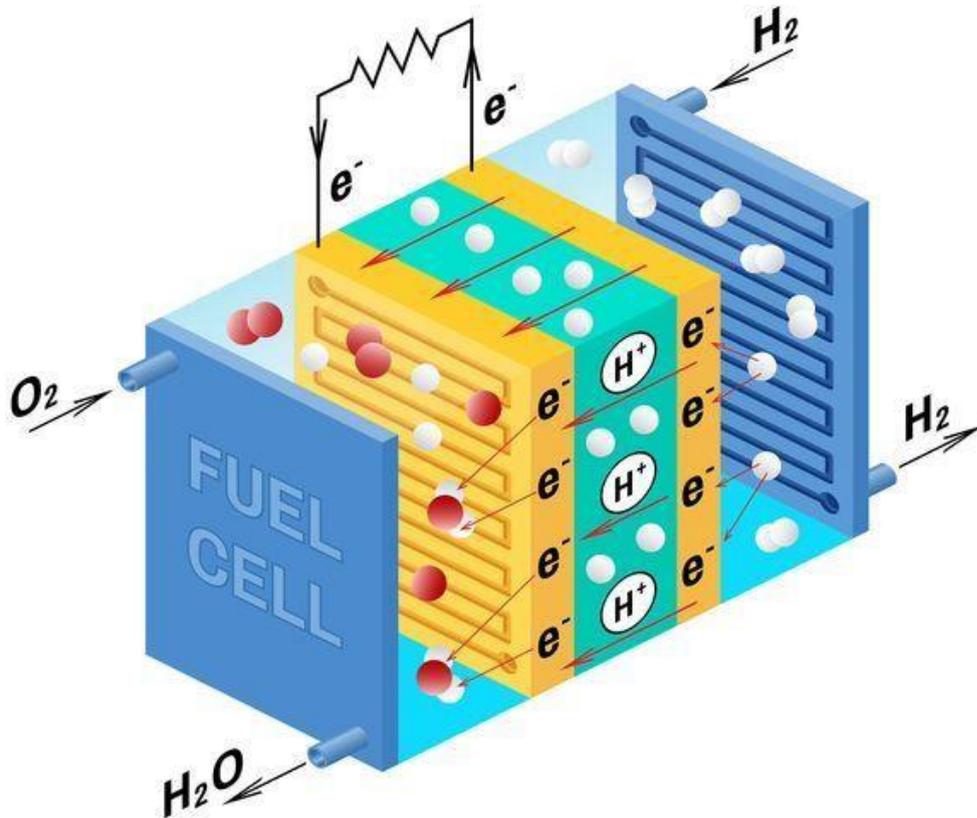


Figura 1, Funcionamiento Fuel Cell, <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2020-10-hydrogen-fuel-cells-explained>

### 2.2.2 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Hidrógeno gris

La producción de hidrógeno gris se refiere al proceso de generación de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, especialmente del gas natural, mediante un procedimiento conocido como reformado de metano con vapor. Este método, que representa aproximadamente el 95% de la producción mundial de hidrógeno, implica la reacción del gas natural con vapor de agua a altas temperaturas (700–1,000 °C) en presencia de un catalizador, generalmente níquel, para producir hidrógeno y monóxido de carbono. Posteriormente, una reacción secundaria conocida como "reacción de cambio de gas de agua" convierte el monóxido de carbono y el vapor adicional en CO<sub>2</sub> y más hidrógeno. A pesar de su eficiencia y bajo costo, el proceso SMR es intrínsecamente intensivo en carbono, dado que el CO<sub>2</sub> liberado durante las reacciones químicas se emite directamente a la atmósfera, contribuyendo significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero.

A pesar de ser un proceso técnicamente eficiente, la producción de hidrógeno gris es responsable de una considerable huella de carbono. Por cada kilogramo de hidrógeno producido mediante SMR, se generan aproximadamente 9 a 12 kilogramos de CO<sub>2</sub>, lo que pone de relieve el desafío ambiental asociado con esta tecnología.

En la siguiente imagen se puede ver el proceso, con la opción de almacenar el CO<sub>2</sub> generado, como se verá más adelante

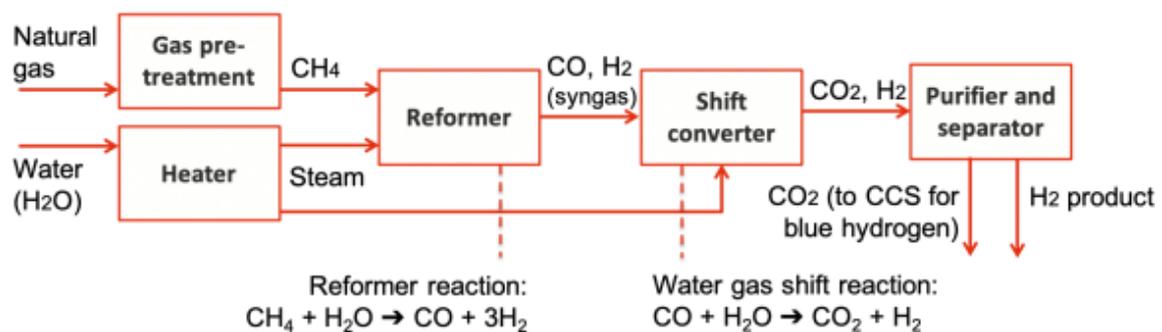


Figura 2, Obtención de hidrógeno gris/azul, <https://broadleaf.com.au/resource-material/the-colour-of-hydrogen/>

El hidrógeno azul representa una evolución del hidrógeno gris, incorporando tecnologías avanzadas de captura y almacenamiento de carbono para reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas con la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. A diferencia del hidrógeno gris, donde el CO<sub>2</sub> generado durante el proceso de reformado de metano con vapor se libera directamente a la atmósfera, el hidrógeno azul captura este CO<sub>2</sub> antes de su emisión, lo que resulta en una fuente de hidrógeno con una huella de carbono significativamente menor. Esta tecnología emergente se presenta como una solución intermedia en la transición energética hacia un futuro más sostenible, especialmente en regiones con acceso abundante a gas natural y almacenamiento geológico adecuado para CO<sub>2</sub>.

Aunque el hidrógeno azul ofrece una reducción significativa de las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con el hidrógeno gris, no es completamente libre de carbono. Las tasas de captura de CO<sub>2</sub> en las plantas de hidrógeno azul suelen variar entre el 60 y 65%[2], lo que implica que una fracción del CO<sub>2</sub> todavía se emite a la atmósfera. Además, la extracción de gas natural, la materia prima usada en la producción de hidrógeno azul, a menudo implica emisiones fugitivas de metano, un potente gas de efecto invernadero. Por tanto, la evaluación del impacto ambiental del hidrógeno azul debe considerar tanto las emisiones directas de CO<sub>2</sub> como las emisiones fugitivas de metano asociadas con la cadena de suministro de gas natural.

### Hidrógeno verde

El hidrógeno verde se produce mediante el proceso de electrolisis. Únicamente es hidrógeno verde cuando se utiliza energía generada a partir de fuentes renovables, como pueden ser la eólica, la solar o la nuclear. Para la producción de hidrógeno en la electrolisis, se parte del agua y se divide en moléculas de hidrógeno y oxígeno.

### 2.2.3 GASOLINERAS DE HIDRÓGENO

En la actualidad, el desarrollo de infraestructura de gasolineras de hidrógeno (hidrogeneras) es limitado. A pesar de los avances en la promoción del hidrógeno como fuente de energía limpia y su potencial para descarbonizar el sector del transporte, existen pocas hidrogeneras operativas en el país, lo que limita la adopción de vehículos eléctricos de celda de combustible FCV. En la siguiente imagen se puede ver un mapa de las hidrogeneras en España, incluyendo las que están en construcción.



Figura 3, Mapa gasolineras de hidrógeno España y Portugal, <https://gasnam.es/mapa-estaciones-gas-natural-hidrogeno/>

## 2.3. TECNOLOGÍA E INFRAESTRUCTURA EV

### 2.3.1 DESARROLLO DE TECNOLOGÍA DE BATERÍAS DE LITIO

En los últimos años se han desarrollado a un rápido desarrollo en los últimos años, reduciendo su coste notablemente y haciendo que los vehículos eléctricos sean más competitivos en el mercado.

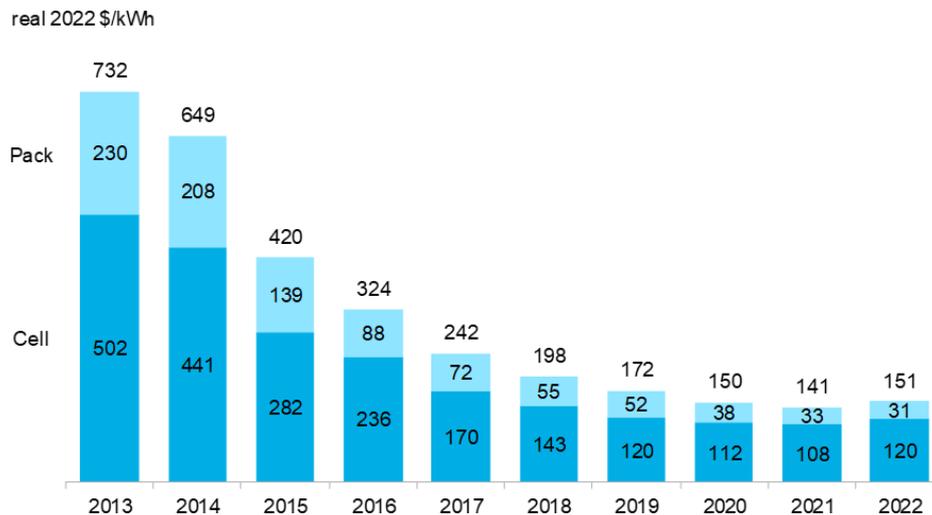


Figura 4, Evolución precio baterías de litio, <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/>

Estas mejoras, junto a subvenciones del estado, han resultado en un gran crecimiento de ventas de los vehículos eléctricos e híbridos. Además de seguir invirtiendo en investigación para reducir los precios de las baterías para hacerlos más asequibles, también se debería invertir en la reducción de las emisiones de CO2 relacionadas con la batería, que suponen un 45% de las emisiones totales del vehículo como se verá más adelante.

### ***2.3.2 ESTACIONES DE RECARGA EN ESPAÑA***

Actualmente hay 14.946 puntos de recarga en España según Electromaps. [4]

Estos vehículos se pueden cargar también en enchufes domésticos, pero a un ritmo más lento. Políticas gubernamentales impulsan con medidas la expansión de la red de recarga rápida. En España, se estipula que la comunidad de vecinos no puede prohibir la instalación de punto de recarga de un particular en un garaje comunitario. El estado español también ofrece ayudas y subvenciones a la instalación de cargadores, mediante el plan MOVES del instituto para la diversificación de la energía. Ofrece hasta un 70% de subvención sobre el coste de la instalación, y una ayuda del 80% en municipios de menos de 5000 habitantes para promover el uso del vehículo eléctrico fuera de las ciudades. [5]

### ***2.3.3 IMPORTANCIA DEL MIX DE GENERACIÓN ELÉCTRICO***

El mix de electricidad es un factor crucial en las emisiones indirectas asociadas con los vehículos eléctricos. Dado que los EV dependen de la electricidad para su funcionamiento, la composición de las energías utilizadas para generar esa electricidad tiene un impacto significativo en sus emisiones de CO<sub>2</sub>. Si la electricidad proviene principalmente de fuentes renovables, como la energía solar, eólica o hidroeléctrica, las emisiones indirectas de CO<sub>2</sub> son considerablemente bajas, lo que mejora las emisiones del EV. En cambio, si la electricidad se genera en gran parte a partir de combustibles fósiles, como el carbón o el gas natural, las emisiones indirectas pueden ser mucho más altas. Por eso es importante que la adopción de los EV siempre vaya acompañada de la descarbonización del mix energético.

## **2.5 LCI (INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA) FCEV**

### ***1.6 2.5.1 INTRODUCCIÓN***

Para el inventario de ciclo de vida del vehículo de hidrógeno se ha decidido utilizar el vehículo Hyundai Nexu. Actualmente dos fabricantes de coches de hidrógeno Hyundai y Toyota. Sin embargo, el vehículo de Toyota no tenía un coche eléctrico de un tamaño similar a su coche de hidrógeno, por lo que se ha decidido usar 2 vehículos de Hyundai, para mantener coherencia en el trabajo.

En ambos inventarios de ciclo de vida se supondrá una vida del vehículo de 160.000km, que es la garantía que ofrece Hyundai en el vehículo Kona EV, ya que si fuese más habría que incluir la posibilidad de un cambio de batería.

## 1.7 2.5.2 MATERIAS PRIMAS EN EL FCV

Para la distribución por peso de cada materia prima en el vehículo se ha utilizado la información de un estudio del Argonne National Laboratory [1]. Este estudio aporta un análisis detallado del porcentaje en peso de cada tipo de vehículo según su tecnología de propulsión. En la siguiente tabla se puede ver el porcentaje en peso de cada materia prima en los vehículos propulsados por celdas de hidrógeno.

Componente	% en peso
Acero	58,5
Hierro	2,1
Aluminio	8,9
Cobre/Latón	4,4
Cristal	2,9
Plásticos	8,9
Goma	2
Fibra de carbono	9,3
Otros	3

Tabla 1, % en peso por componente del FCV[1]

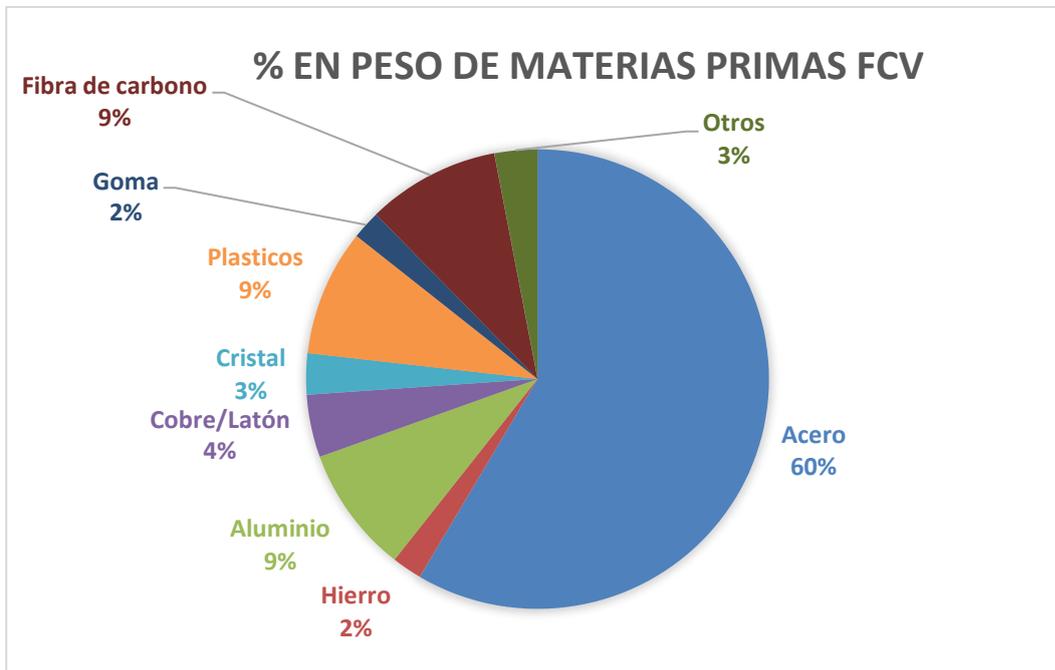


Figura 5, distribución de peso en el FCV, [1]

Se obtiene el peso del vehículo de las especificaciones del fabricante, que es de 1743kg, y se obtiene el peso por materia prima.

Componente	kg
Acero	1019,7
Hierro	36,6
Aluminio	155,1
Cobre/Latón	76,7
Cristal	50,5
Plásticos	155,1
Goma	34,9
Fibra de carbono	162,1
Otros	52,3

Tabla 2, Pesos Hyundai Nexa, elaboración propia

Los siguientes datos se han introducido al software de LCA GaBi, con la base de datos de su versión educativa. Al no ser una versión de pago, hay alguna materia prima que no se ha podido analizar su impacto, pero son cantidades muy pequeñas y se encuentran en la sección de otros en la distribución de peso del vehículo.

Es en esta parte del TFG donde se utiliza GaBi, que es capaz de profundizar en el impacto ambiental real de la extracción y refinamiento de las materias primas. Por ejemplo, en el proceso de formado de un lingote de aluminio de 1kg, tiene en cuenta los 5,6kg minados de bauxita (mineral del que se extrae el aluminio), el mix de energía utilizado cuando se ha utilizado electricidad, y las repercusiones ambientales de otros tipos de energía como puede ser el uso de gas natural en un proceso donde se necesite aportar valor.

Se ha usado cuando ha sido posible el proceso correspondiente a Europa, y donde no ha sido posible por falta de datos se ha usado el proceso correspondiente a Alemania, que es lo más similar y preciso.

En el siguiente gráfico se puede ver las emisiones de GEI, en kg de CO2 equivalentes, de cada materia prima usada en la construcción del Hyundai Nexu.

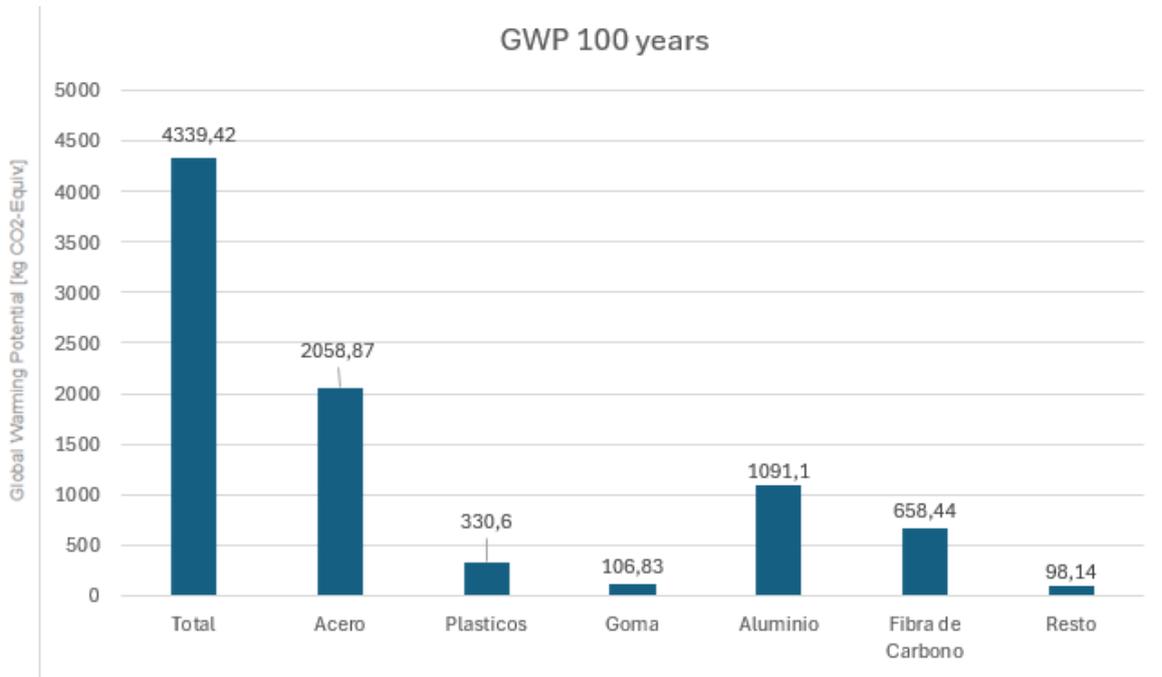


Figura 6, Emisiones de las materias primas del FCV, elaboración propia

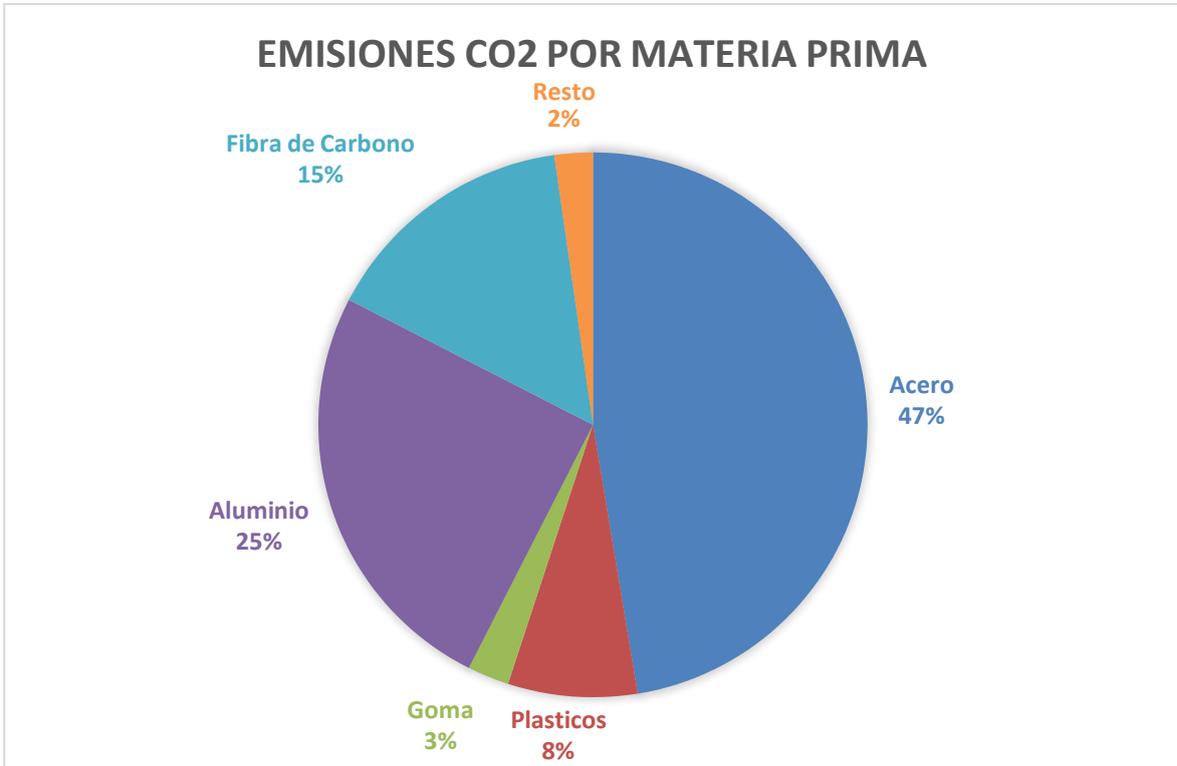


Figura 7, Distribuciones emisiones kg CO2 por materia prima FCEV, elaboración propia

### 2.5.3 FABRICACIÓN DEL FCEV

Para la energía usada en la fabricación del vehículo se ha utilizado el informe por Argonne “Energy-Consumption and Carbon-Emission Analysis of Vehicle and Component Manufacturing” [6] donde se detalla el consumo en MJ/kg de cada una de las materias primas. También aporta un valor de CO2 emitido, pero para hacer el estudio más preciso se utilizará el mix energético del país donde se produce. En concreto el Hyundai Nexso se produce en Corea del sur, por lo que se usara el valor de emisiones de CO2/kWh de Corea.

En este informe diferencia el proceso de cada material, no consume la misma energía la fabricación de acero estampado(5,1MJ/kg) que el acero forjado(45,1MJ/kg). En el caso de que en el informe de materias primas se conozca el método de transformación del material, se usara ese valor. Por ejemplo, el informe menciona que en los FCEV usa un 5,5% de aluminio fundido y un 3,4% de aluminio forjado.

En el caso de que no se conozca esta proporción, como puede ser el caso del acero, se usará la proporción aportada en el informe de consumos de fabricación que son los siguientes.

**TABLE 7 Generalized Material Composition and Primary Transformation Process Listing for Use in the VMA Model**

Material	% of Curb Wt.	Transformation Processes
Iron	10.1	Cast (85%); forged (15%)
Steel	54.2	Stamped (70%); forged (4%) <sup>a</sup>
Aluminum	6.4	Cast (76%); extruded (23%); stamped (1%)
Copper/Brass	1.7	Drawn (68%); cast (32%)
Lead	0.9	Cast (100%)
Rubber	6.8	Compression molded (89%); Injection molded (11%)
Plastics	9.8	Injection molded (40%); thermoset (27%); extruded (16%); compression molded (13%); blow molded (2%); calendared (2%)
Glass	2.8	Float glass (100%)

<sup>a</sup> The remaining steel is machined only.

*Figura 8, Porcentaje de proceso en cada materia prima, [6]*

*2.5 LCI (INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA) FCEV*

Componente (kg)	FCV
Acero estampado	713,8
Acero forjado	40,8
Acero maquinado	265,1
Hierro forjado	36,6
Aluminio fundido	95,9
Aluminio forjado	59,3
Latón	76,7
Glass	50,5
Plásticos	155,1
Goma	34,9

*Tabla 3, componente y proceso del FCV, elaboración propia*

Material	Consumo de MJ/kg
Acero estampado	5,1
Acero forjado	45,1
Acero maquinado	2,015
Hierro forjado	32
Aluminio forjado	55,3
Latón/cobre	7,4
Glass	16
Plásticos	26,4
Goma	12,9

*Tabla 4, Consumo de energía de cada proceso [6]*

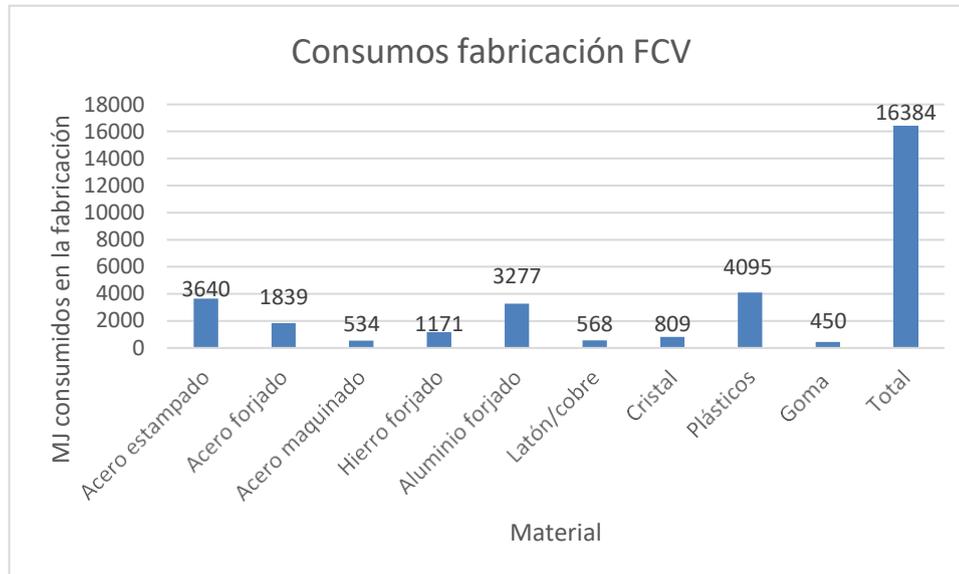


Figura 9, Consumo en MJ de cada proceso en la fabricación del FCV, elaboración propia

Convirtiendo MJ en kWh, y conociendo las emisiones de CO<sub>2</sub> del mix energético de Corea del sur, que son de 170g de CO<sub>2</sub> por kWh, obtenemos un total de 773,7 kg de CO<sub>2</sub> para la fabricación del Hyundai Nexa en su fábrica de Corea.

#### 2.5.4 USO DEL FCV CON HIDRÓGENO VERDE

En este apartado se calcularán las emisiones de CO<sub>2</sub> del uso del vehículo de hidrógeno con la hipótesis de que el hidrógeno es fabricado únicamente mediante electrolisis de energías de fuentes renovables. Por lo tanto, este hidrógeno no tendrá emisiones directas de CO<sub>2</sub>.

Sin embargo, la compresión y distribución del hidrógeno si que conlleva un gasto energético. Esta energía utilizada se supondrá que usa el mix energético español y no únicamente energías de fuentes renovables. En el estudio del Joint Research Center – European commission [7] se indica que se utilizan 0,0864MJ de energía para la compresión y distribución de 1MJ de H<sub>2</sub>. El Hyundai Nexa consume 0,84kg de hidrógeno cada 100km, utilizando 1344kg de hidrógeno en la vida del vehículo(160.000km) [8]. Teniendo en cuenta

que el hidrógeno tiene una densidad energética de 120MJ por kg, se calcula que en la vida del vehículo se utilizan 3,87MWh de energía para su compresión y distribución.

Teniendo en cuenta el mix energético español, que produce 260g de CO<sub>2</sub> por kWh, obtenemos unas emisiones de 1006kg de CO<sub>2</sub> para la distribución y compresión del hidrógeno en el ciclo de vida del Hyundai Nexu.

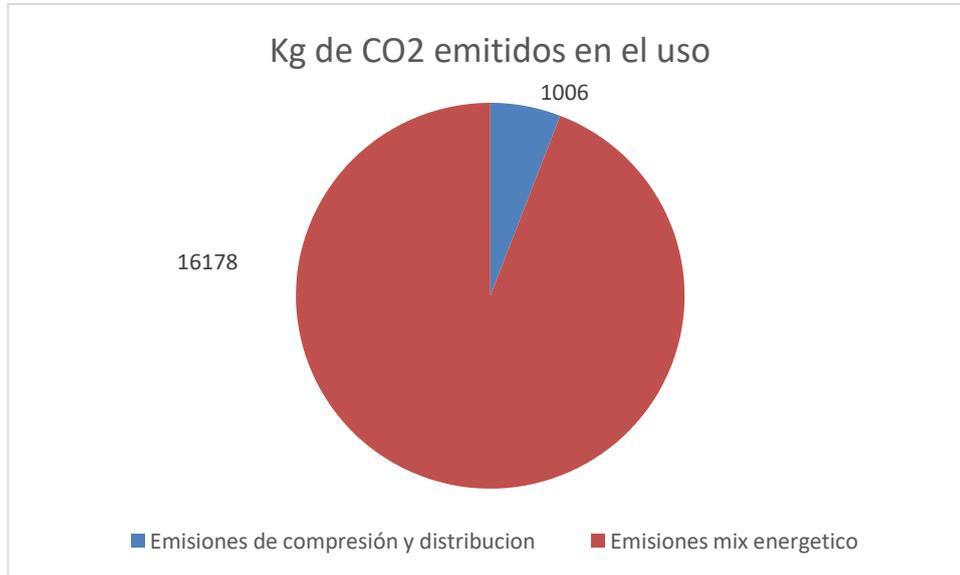
### ***2.5.5 USO DEL FCV CON HIDRÓGENO PRODUCIDO CON EL MIX ELÉCTRICO ESPAÑOL***

A pesar de que el TFG iba a analizar únicamente el uso del vehículo de hidrógeno con hidrógeno verde, se ha decidido añadir un apartado con la producción del hidrógeno mediante electrolisis con el mix eléctrico español.

Para este apartado, las emisiones de CO<sub>2</sub> de la distribución y compresión del hidrógeno serán las mismas que las calculadas en el apartado anterior.

Como se ha visto en el apartado anterior, el Hyundai Nexu consume un total de 1344kg de hidrógeno en total, que con la densidad energética del hidrógeno de 120MJ/kg, se obtiene una energía total de 161.280MJ. Este valor se refiere a la energía almacenada en el hidrógeno, sin embargo, desde la energía de la red hasta la producción del mismo tiene que pasar por la electrolisis. Según el ministerio español de industria y turismo [12], la eficiencia de la electrolisis del hidrógeno está en un rango del 62-82%, dependiendo del tamaño del electrolizador, por lo que se usará un valor intermedio de 72% de eficiencia.

Asumiendo unas emisiones de 260g de CO<sub>2</sub> por kWh del mix energético español, se obtienen unas emisiones de 16.178kg de CO<sub>2</sub>.



*Figura 10, Distribución de emisiones de CO<sub>2</sub> del FCEV, diferenciando emisiones del mix energético y emisiones de la compresión y distribución, elaboración propia*

## 2.6 LCI (INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA) EV

### 2.6.1 INTRODUCCIÓN

Para el inventario del ciclo de vida se ha elegido el vehículo Hyundai Kona EV, que es el vehículo eléctrico más parecido al Hyundai Nexa, en términos de tamaño y de peso. Se ha elegido la versión con la batería de 64kWh, con una autonomía de 510km, que es la más parecida a la autonomía de Hyundai Nexa de 666km.

### 2.6.2 MATERIAS PRIMAS

Para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> de las materias primas del vehículo, excluyendo las baterías, se ha seguido el mismo proceso que en el apartado 2.5.2. EL Hyundai Kona EV tiene un peso sin baterías de 1348kg

Material	kg
Acero	904,5
Hierro	35,0
Aluminio fundido	12,1
Aluminio forjado	78,2
Latón	59,3
Magnesio	0,1
Cristal	51,2
Plásticos	140,2
Goma	31,0
Otros	36,4

Tabla 5, distribución peso Hyundai Kona EV sin batería, elaboración propia

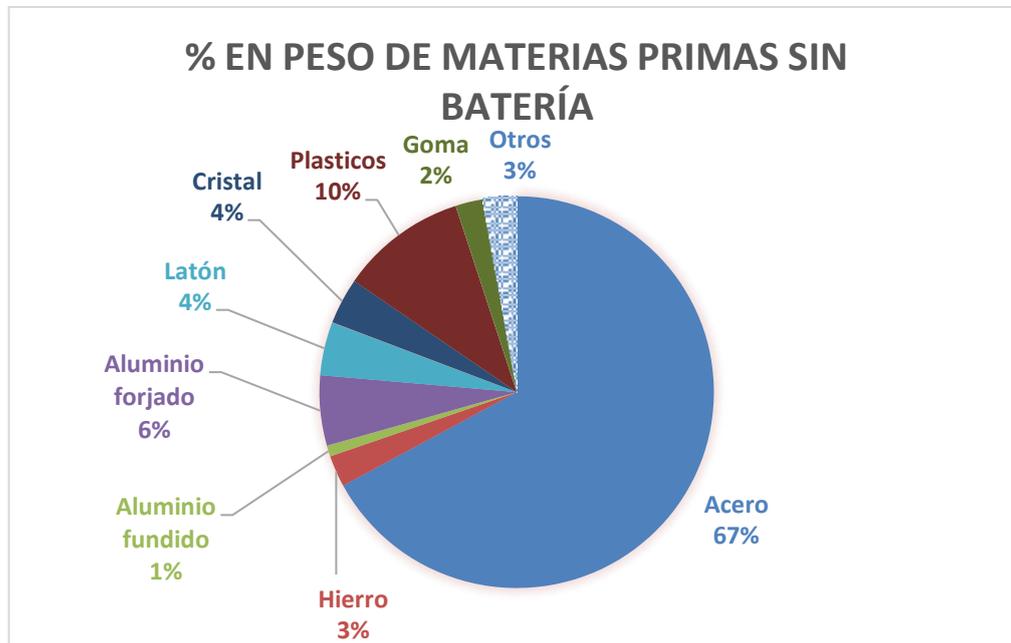


Figure 11, distribución de peso en el EV, [1]

Para el cálculo de las emisiones de las materias primas de la batería, se han utilizado los datos un informe de “Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles” [9]. El informe calcula unas emisiones de 29,9 MJ para una batería de 325kg. Conociendo el peso de la batería del Hyundai Kona EV, que es de 425kg, se calcula que se necesita 39,1MJ de energía para las materias primas de la batería. Para las emisiones de CO2 correspondientes, se usará el mix energético mundial debido a las diversas fuentes de las materias primas utilizadas en la batería. El mix mundial energético emite 473g de CO2 por kWh de energía.

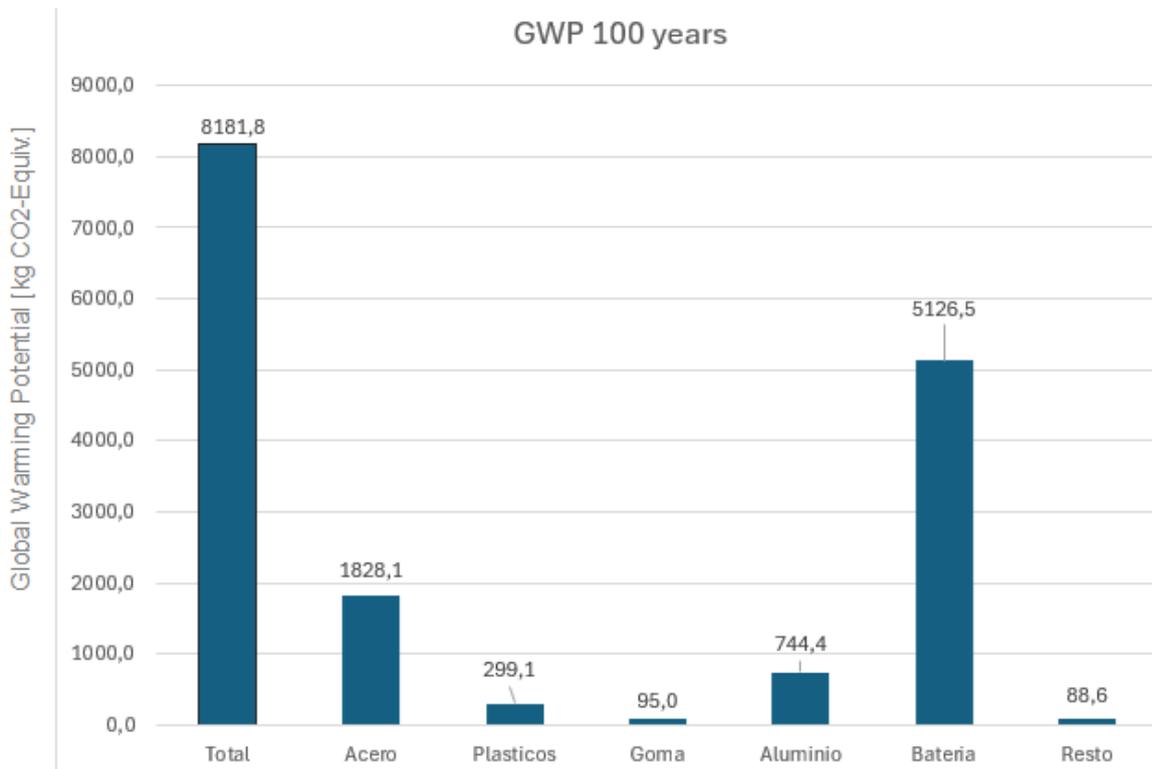


Figura 12, Emisiones de las materias primas del EV, elaboración propia

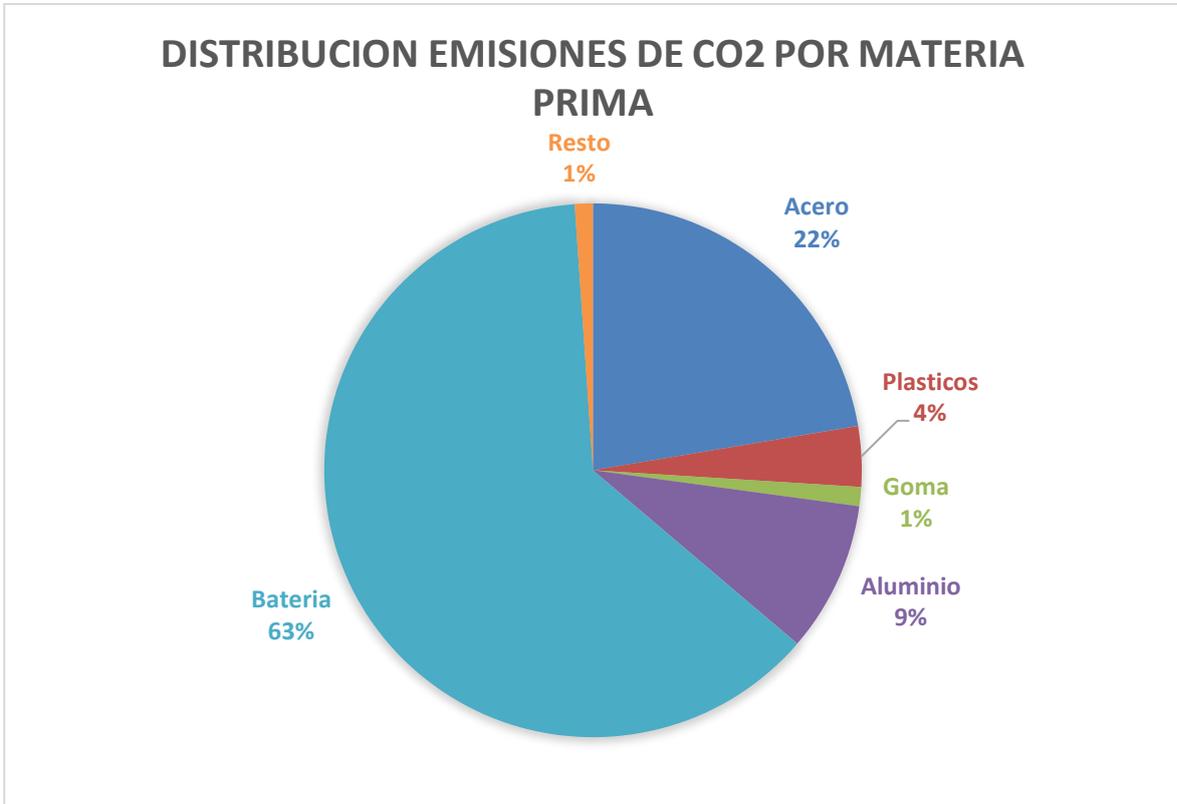


Figure 13, Distribuciones emisiones kg CO2 por materia prima EV, elaboración propia

### 2.6.3 FABRICACIÓN

Para la fabricación del vehículo eléctrico, excluyendo las baterías, se sigue el mismo método que en el apartado 2.5.3

Material	Consumo de MJ/kg
Acero estampado	5,1
Acero forjado	45,1
Acero maquinado	2,015
Hierro forjado	32
Aluminio forjado	55,3
Latón/cobre	7,4
Glass	16
Plásticos	26,4
Goma	12,9

Tabla 6, consumos de energía por proceso, [6]

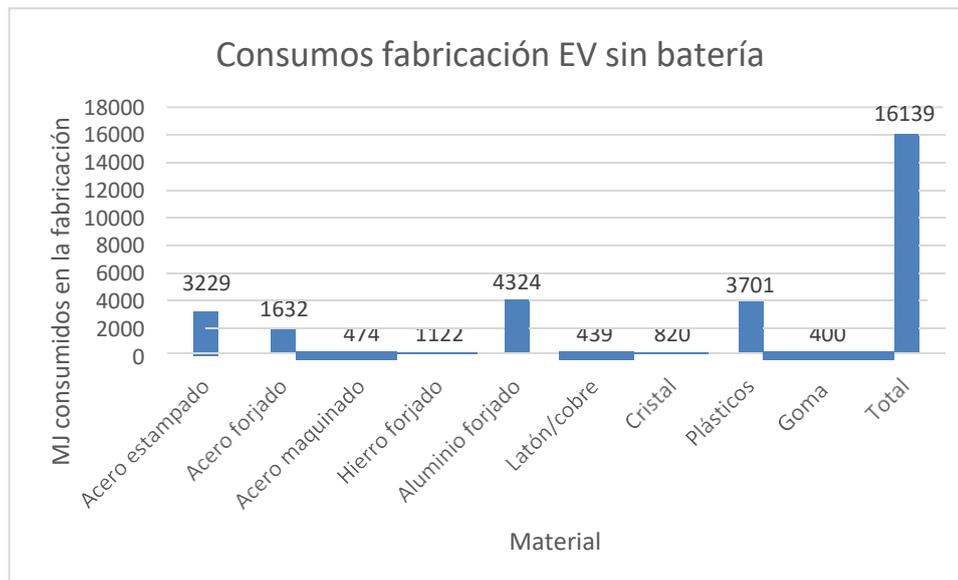


Figura 14, Consumo en MJ de cada proceso en la fabricación del FCV, elaboración propia

Tranformando MJ en kWh, y conociendo las emisiones de CO<sub>2</sub> del mix energético de la Republica Checa que son de 450g de CO<sub>2</sub> por kWh, se obtiene un total de 2017,4kg de CO<sub>2</sub> para la fabricación del Hyundai Kona EV en su fábrica de la Republica Checa.

Para calcular las emisiones en la fabricación de la batería, se utilizan los datos de un informe de [9] “Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles”, donde se proporcionan los consumos de energía de cada proceso de la fabricación de la batería por kg.

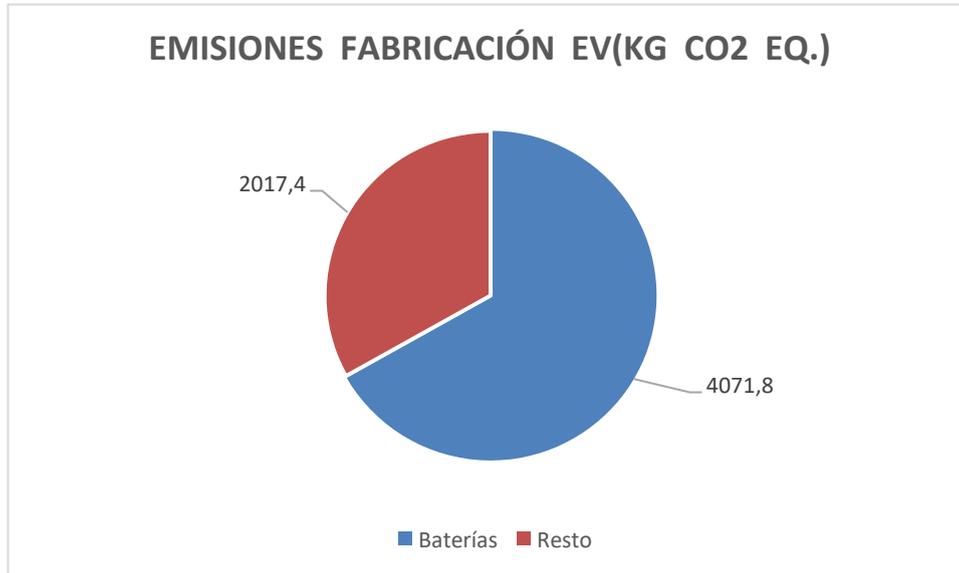
**Table 1. Unit process energy consumption in battery manufacturing**

Unit Process	Time (minute)	Energy use per cell (kWh)	Specific energy use per pack (kWh kg <sup>-1</sup> )
Mixing	1.0	0.11	0.12
Coating	0.3	0.18	0.21
Drying	192	6.22	19.29
Calendaring	1.2	0.38	1.15
Notching	3.0	0.71	2.14
Stacking	3.0	0.77	2.36
Welding&sealing	1.2	0.25	0.72
LiPF <sub>6</sub> filling	1.2	0.59	0.20
Final sealing	3.6	0.10	1.87
Pre-charging	93.7	0.07	0.30
Dry room	13.2	3.9	21.78
Battery pack assembly		/	0.03

*Figura 15, Emisiones de cada proceso en la producción de la batería [9]*

Este informe calcula un consumo de 50,17 kWh por kg de batería. Sin embargo, estos datos son el resultado de un experimento a pequeña escala, y en el propio informe menciona que los consumos energéticos en la fabricación de la batería se reducen un 72% cuando se fabrican a gran escala, por lo que se utilizará el valor de 14,05kWh por kg de batería.

Multiplicando este valor por el peso de la batería, y usando el mix energético de Indonesia, que es donde se fabrican las baterías del Hyundai Kona EV, se obtiene la huella de carbono de la fabricación de las baterías. Las emisiones de CO<sub>2</sub> por kWh en Indonesia son de 682 gramos de CO<sub>2</sub> por kWh. Con estos datos, se obtiene que la fabricación de la batería emite 4072kg de CO<sub>2</sub>.



*Figura 16, emisiones de CO2 del EV, diferenciando batería y el resto del vehículo, elaboración propia*

### ***2.6.4 USO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO***

Para las emisiones del Hyundai Kona EV se utiliza el consumo de 14,7kWh/100km proporcionado por la propia marca [10]. Utilizando el mix eléctrico español, donde se emiten 260g de CO<sub>2</sub> por kWh, obtenemos unas emisiones de 6115kg de CO<sub>2</sub> en el uso del Hyundai Kona EV.

## 2.7 EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL CICLO DE VIDA

En este apartado se resumirán los datos calculados anteriormente.

Emisiones CO2 totales(kg)	Materias primas	Fabricación	Uso	Total
FCV Hidrógeno verde	4339	774	1006	6119
FCV Hidrógeno mix español	4339	774	17184	22297
EV	8182	6089	6115	20386

Tabla 7, emisiones totales (kg CO2) por tecnología y procedencia de la energía, elaboración propia

En el siguiente gráfico se puede observar las emisiones totales de cada tecnología, mostrando la aportación de cada fase de su ciclo de vida a las emisiones totales.

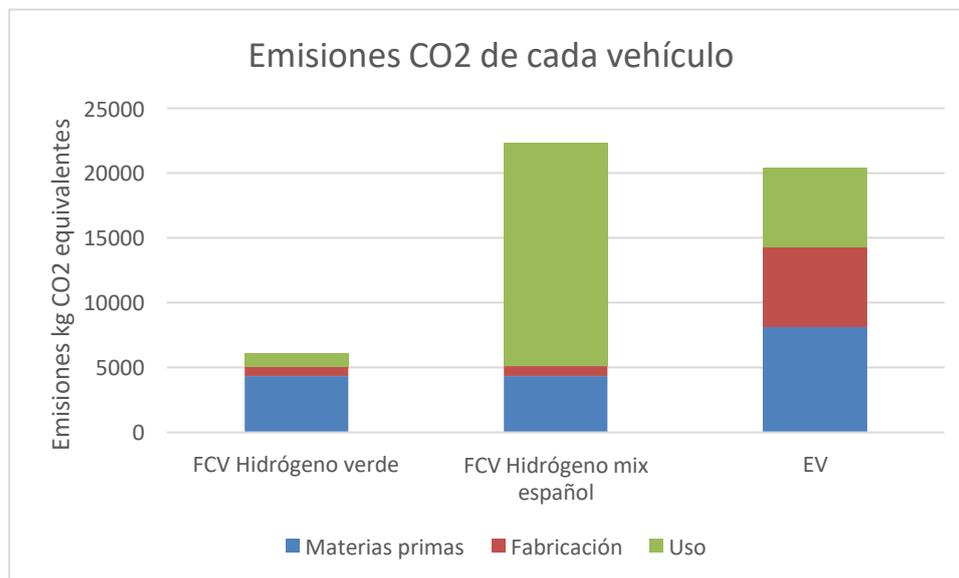


Figura 17, Emisiones de CO2 de cada vehículo, diferenciando entre fases del ciclo de vida, elaboración propia

En el siguiente gráfico se pueden ver la distribución de las emisiones del Hyundai Kona EV, diferenciando las emisiones relacionadas con la batería, incluyendo materias primas y fabricación; las emisiones relacionadas con el uso y las emisiones de las materias primas y la producción sin tener en cuenta la batería.

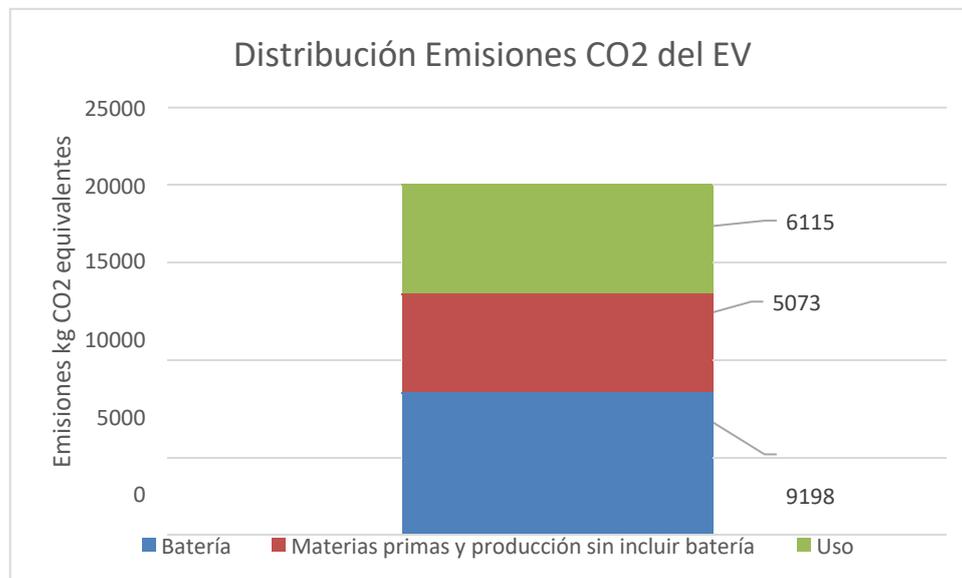
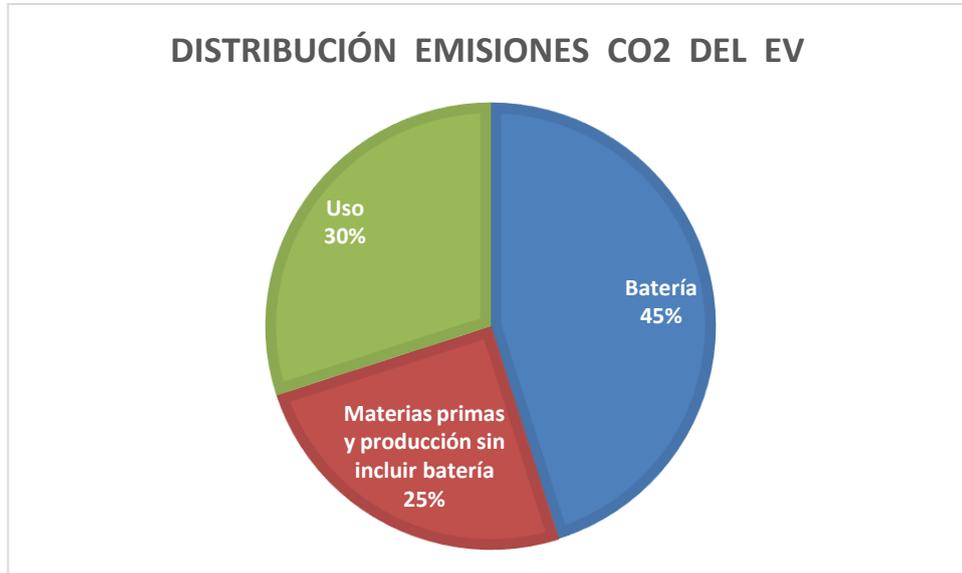


Figura 18, Emisiones de CO2 del EV, diferenciando emisiones debidas a la batería, a las materias primas y producción del vehículo y al uso del vehículo, elaboración propia



*Figura 19, Proporción emisiones de CO2 del EV, diferenciando emisiones debidas a la batería, a las materias primas y producción del vehículo y al uso del vehículo, elaboración propia*

## 2.8. CONCLUSIONES

En conclusión, el presente TFG ha evaluado el impacto ambiental de diferentes tecnologías de vehículos, centrándose específicamente en las emisiones de CO<sub>2</sub> a lo largo de su ciclo de vida, y se ha intentado ser lo más preciso posible con los recursos disponibles.

Los resultados obtenidos indican que los vehículos de hidrógeno alimentados con hidrógeno verde son la opción más favorable en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, generando 6119kg de CO<sub>2</sub> a lo largo de todo su ciclo de vida. Este resultado resalta el potencial del hidrógeno verde como una alternativa viable y sostenible para la movilidad futura, especialmente en la reducción de gases de efecto invernadero.

En cambio, las emisiones de CO<sub>2</sub> del FCV utilizando hidrógeno producido con el mix energético español actual (22297kg) son muy similares a las del vehículo eléctrico, que genera aproximadamente 20,386kg de CO<sub>2</sub>. Esto sugiere que, aunque ambas tecnologías presentan ventajas en comparación con los vehículos de combustión interna tradicionales, su impacto ambiental depende en gran medida de la fuente de energía utilizada para la producción del hidrógeno y la electricidad. Por lo tanto, para maximizar los beneficios ambientales de estas tecnologías, es fundamental seguir promoviendo la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

También es crucial seguir trabajando en el desarrollo de tecnologías de las baterías de los coches eléctricos y buscar soluciones más favorables energéticamente. Se debe mejorar la huella de carbono en la obtención de las materias primas y en la fabricación de la batería, ya que entre ambas aportan un 45% de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la vida del Hyundai Kona EV como se ha visto en este estudio, 9198kg de CO<sub>2</sub> que es más que las emisiones totales del vehículo de hidrógeno utilizando únicamente hidrógeno verde.

Cabe recalcar que en este estudio se ha analizado el impacto ambiental únicamente, sin tener en cuenta el aspecto económico. Para desarrollar una red de gasolineras de hidrógeno haría falta una inversión fuerte, posiblemente por parte del estado para fomentar la reducción de emisiones por parte de la industria de transporte. Como se ha mencionado en la introducción a la memoria, el hidrógeno puede ser una solución al almacenamiento de energía para la red y se debería estudiar una infraestructura conjunta. Tampoco se ha tenido en cuenta las pérdidas económicas que suponen las pérdidas energéticas en el FCV debido a las pérdidas en la electrolisis y en la celda de hidrógeno que propulsa el vehículo.

En resumen, y con los datos aportados por este informe, se puede concluir que el hidrógeno es una muy buena solución a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, mejor que la del vehículo eléctrico si el mix de energía contiene un alto porcentaje de renovables. Se debería de invertir e impulsar esta tecnología para que, junto con los EV, se pueda descarbonizar la industria del transporte en el mundo.

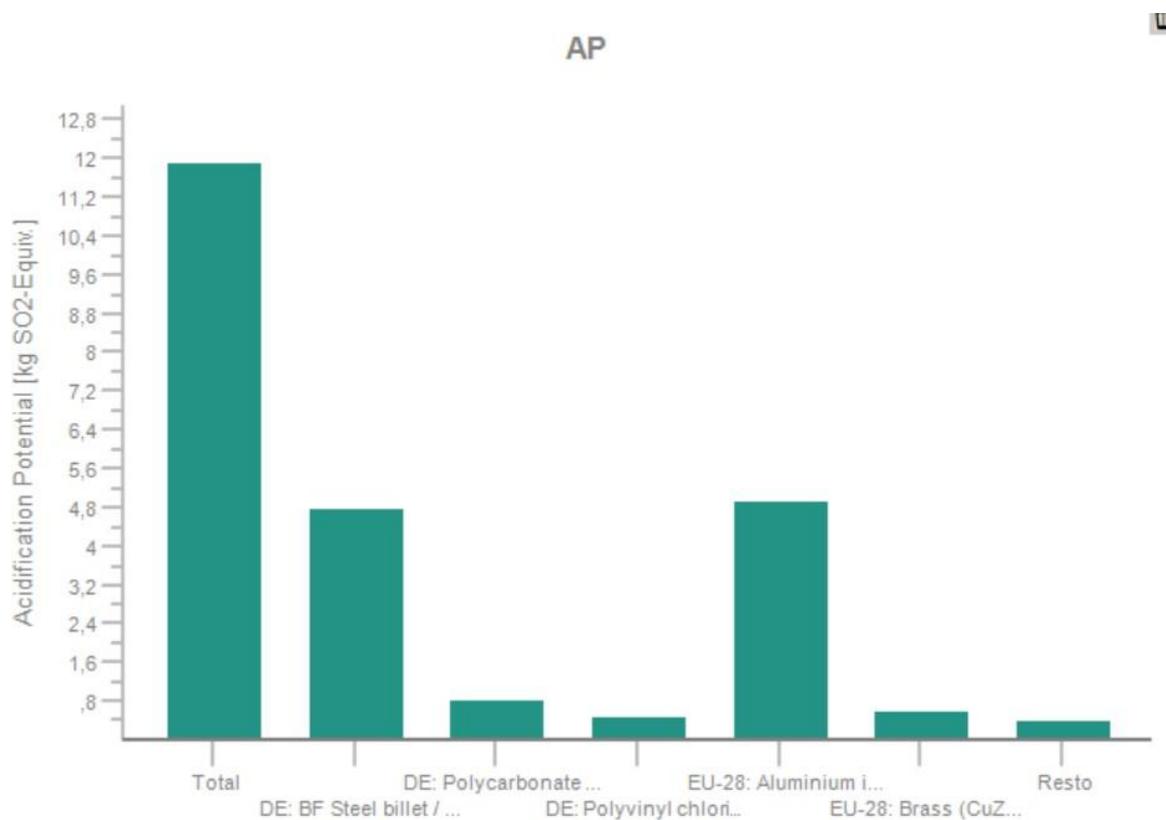
## 3. BIBLIOGRAFIA

- [1] “Updated Vehicle Specifications in the GREET Vehicle-Cycle Model” -Andrew Burnham - Center for Transportation Research - Argonne National Laboratory - July 2012
- [2] <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/diferencia-hidrogeno-verde-azul#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20azul&text=Este%20CO2%20se%20puede,se%20emite%20a%20la%20atm%C3%B3sfera>
- [3] <https://www.hyundai.news/es/modelos/eco/nexo/press-kit/nuevo-hyundai-nexo-prestaciones.html>
- [4] <https://www.electromaps.com/es/puntos-carga/espana>
- [5] <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-movilidad-y-vehiculos/programa-moves-iii>
- [6] “Energy-Consumption and Carbon-Emission, Analysis of Vehicle and Component Manufacturing” by J.L. Sullivan, A. Burnham, and M. Wang - Center for Transportation Research Energy Systems Division, Argonne National Laboratory
- [7] “JEC Well-to-Tank report v5” – Joint Research Center – European commission
- [8] <https://www.hyundai.news/es/modelos/eco/nexo/press-kit/nuevo-hyundai-nexo-prestaciones.html>
- [9] “Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles” - Chris Yuan, Yelin Deng, Tonghui Li, Fan Yang
- [10] [https://www.hyundai.com/content/dam/hyundai/au/en/models/kona-ev/key-features/Kona\\_Electric\\_Spec\\_Sheet\\_Jan\\_2024\\_V2.pdf](https://www.hyundai.com/content/dam/hyundai/au/en/models/kona-ev/key-features/Kona_Electric_Spec_Sheet_Jan_2024_V2.pdf)
- [11] <https://www.statista.com/markets/408/topic/949/emissions/#overview>
- [12] “LA ELECTRÓLISIS COMO UNA HERRAMIENTA CLAVE DE LA DESCARBONIZACIÓN DEL SIGLO XXI” – Javier Brey, Ministerio de Industria y Turismo
- [13] <https://normasiso.org/norma-iso-14044/>

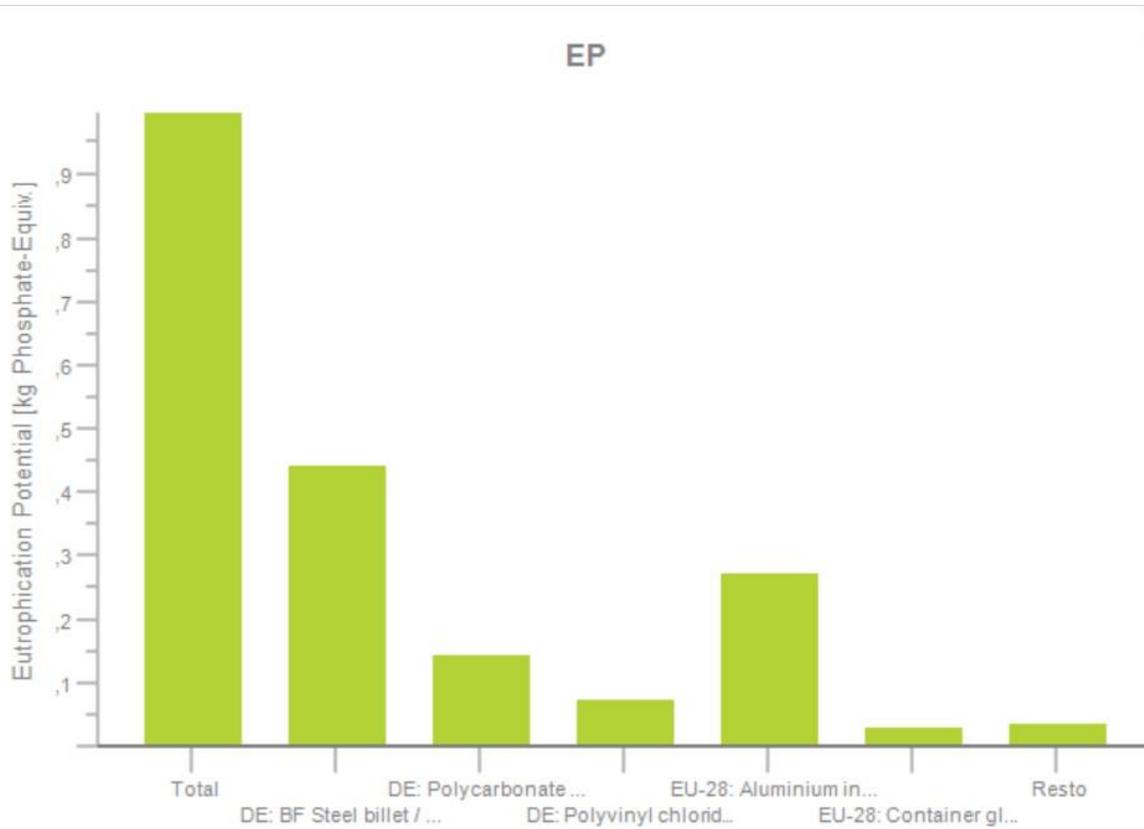
## 4. ANEXOS

### OTROS IMPACTOS AMBIENTALES DE LA OBTENCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS DEL FCV, HYUNDAI NEXO.

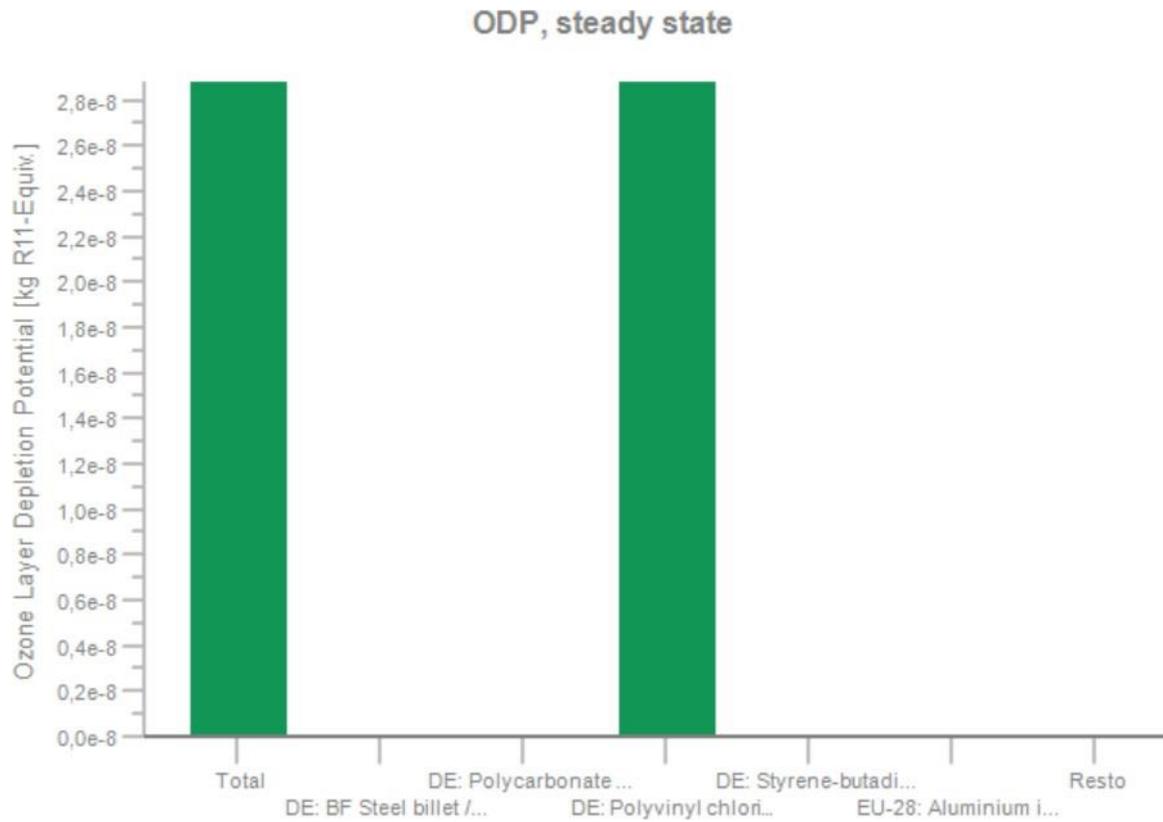
Acidificación potencial



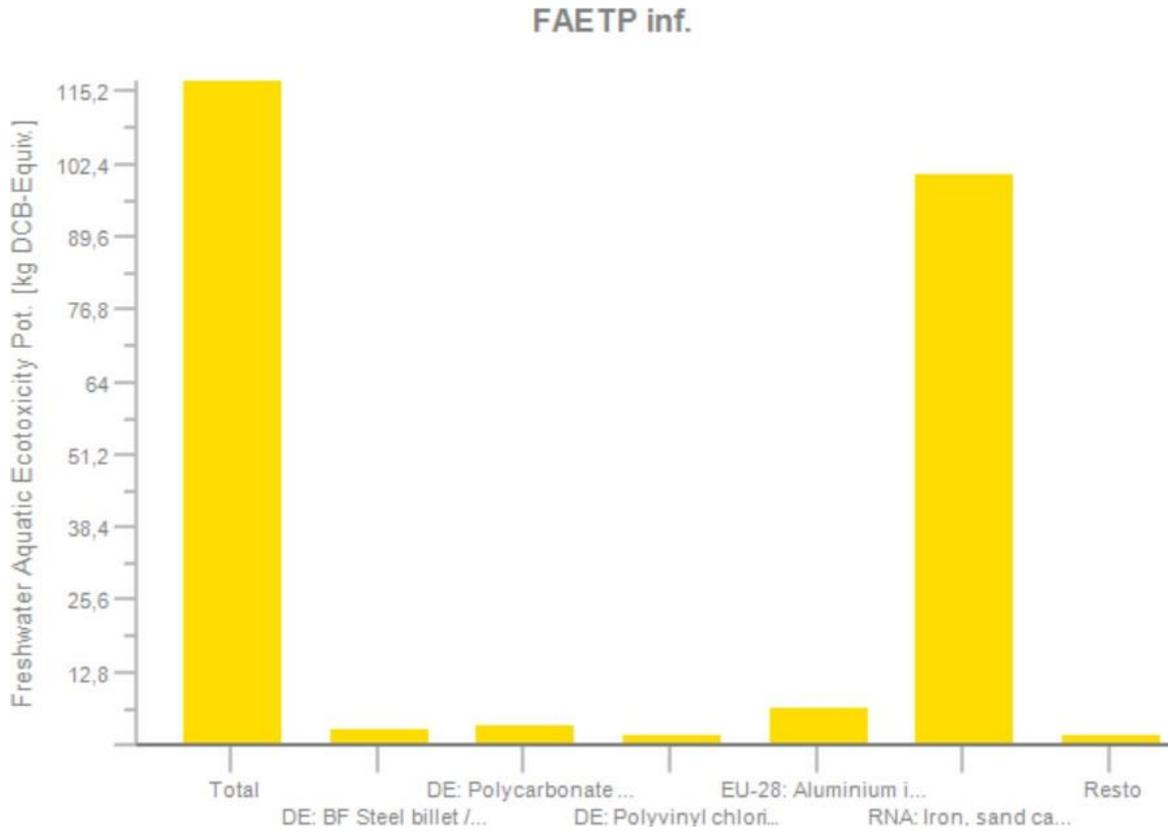
Eutrofización



Destrucción de la capa de ozono

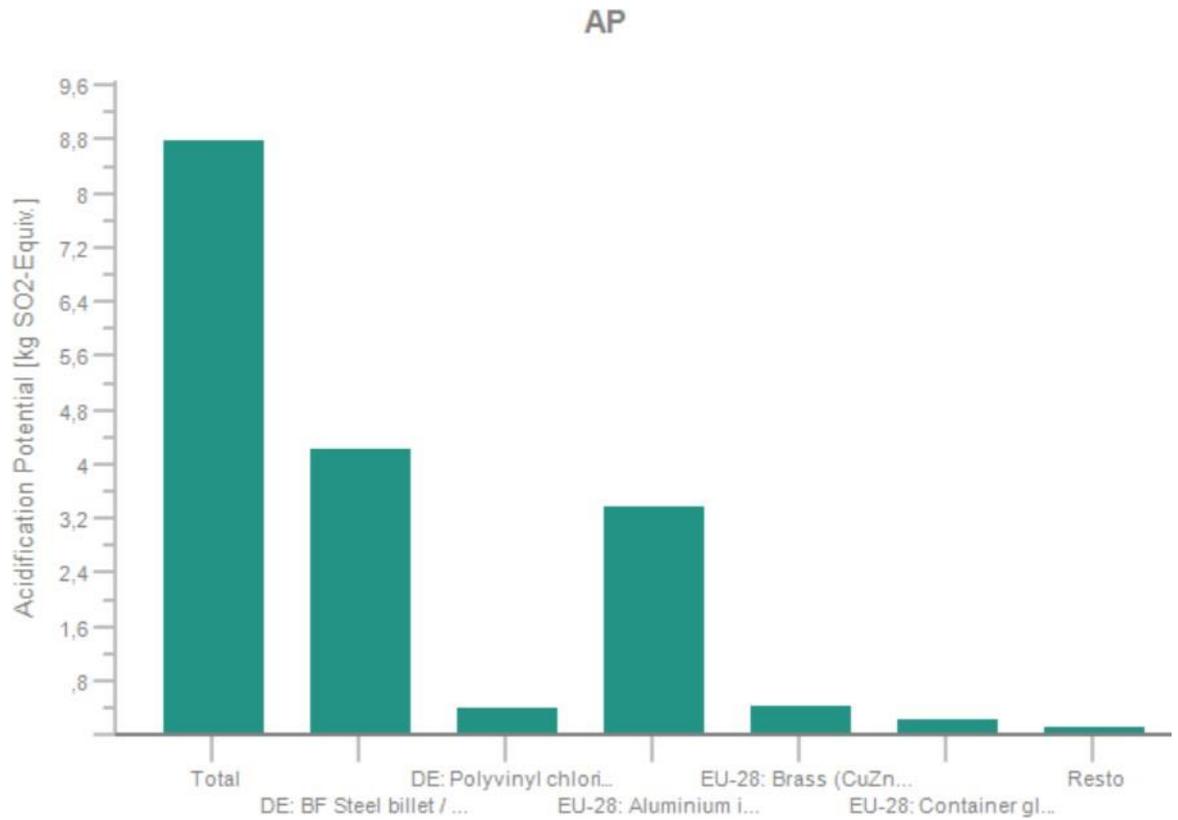


Potencial de Ecotoxicidad Acuática en Agua Dulce (FAETP)

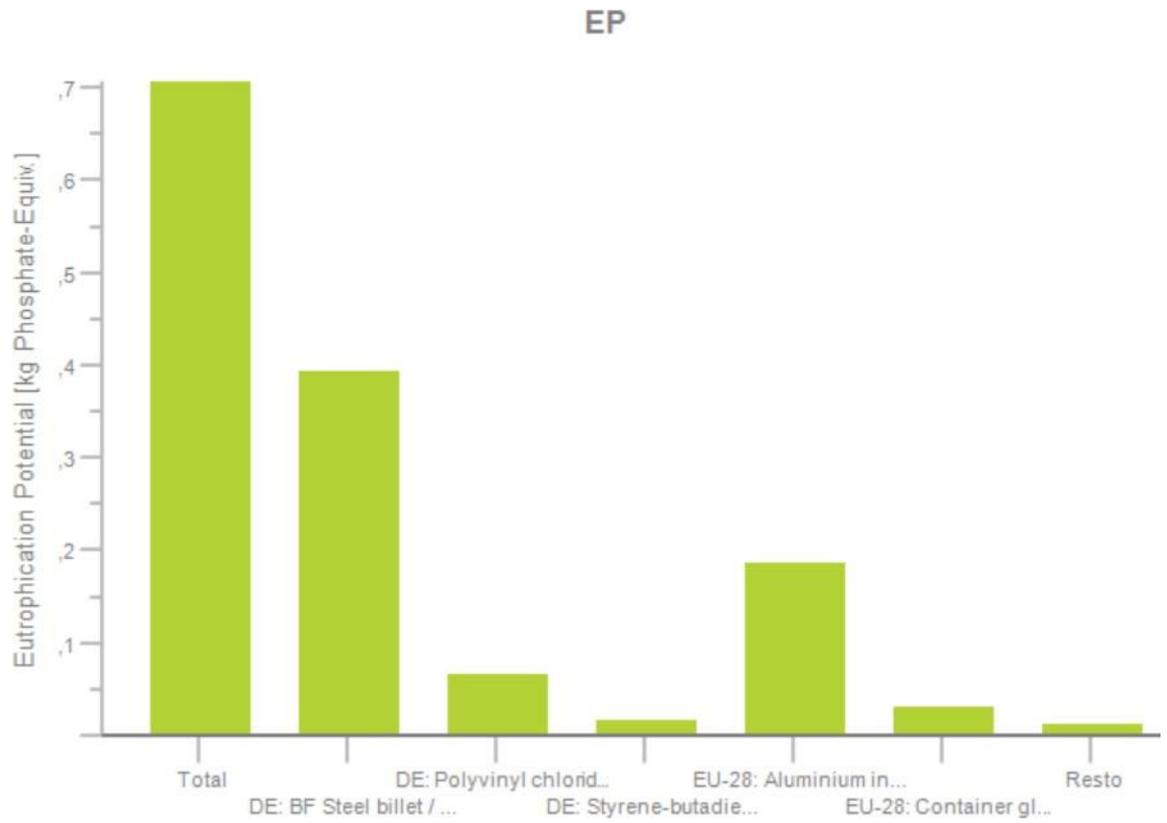


**OTROS IMPACTOS AMBIENTALES DE LA OBTENCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS DEL FCV, HYUNDAI NEXO.**

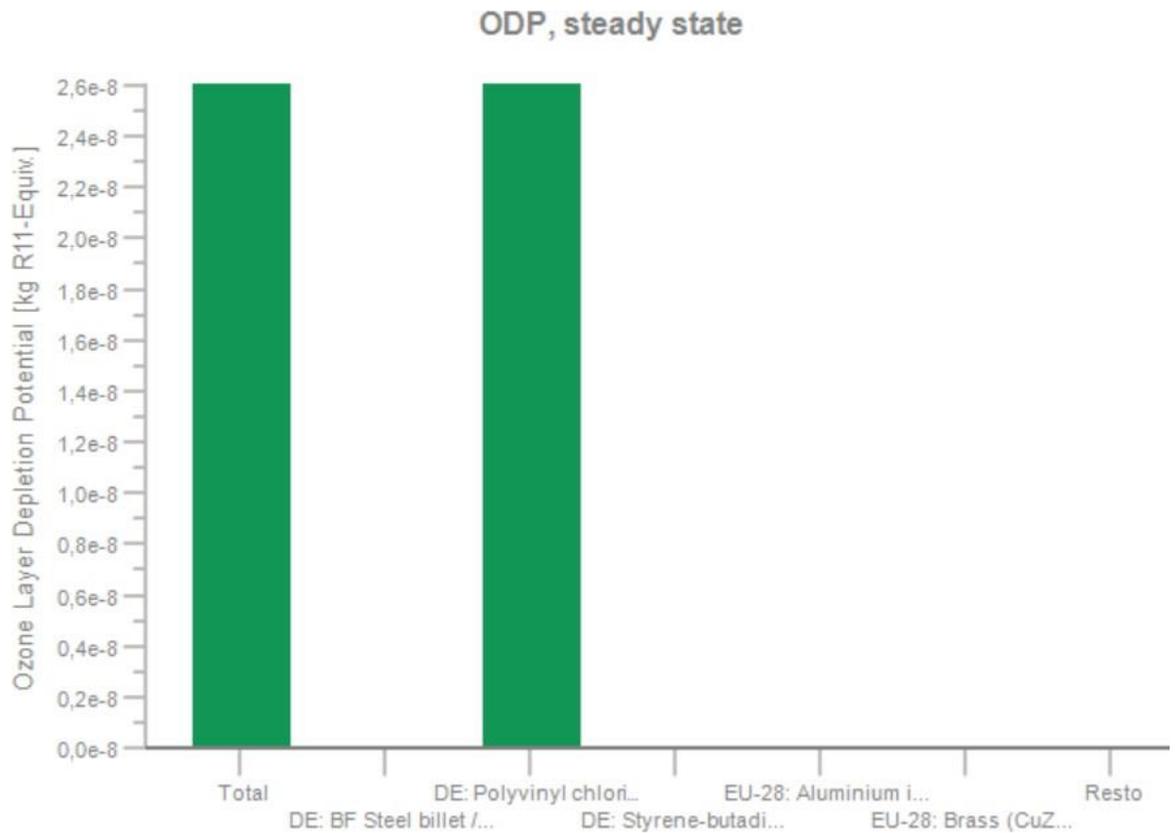
Acidificación potencial



Eutrofización



Destrucción de la capa de ozono



Potencial de Ecotoxicidad Acuática en Agua Dulce (FAETP)

FAETP inf.

