



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO  
ANÁLISIS DEL TRANSPORTE PÚBLICO  
TERRESTRE Y MEDIOS PARA SU  
DESCARBONIZACIÓN

Autor: Eva Bravo Bernal

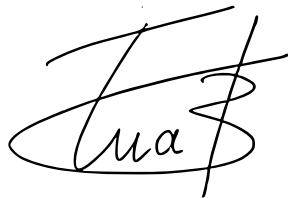
Director: Alberto Mascareñas Brito

Madrid, Julio 2023



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
“Análisis del transporte público terrestre y medios para su descarbonización”  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

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

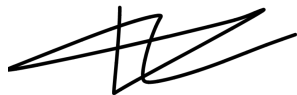


Fdo.: Eva Bravo Bernal

Fecha: .10../ ..07../ ..2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Alberto Mascareñas Brito

Fecha: .10../ ..07../ ..2023





**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO  
ANÁLISIS DEL TRANSPORTE PÚBLICO  
TERRESTRE Y MEDIOS PARA SU  
DESCARBONIZACIÓN

Autor: Eva Bravo Bernal

Director: Alberto Mascareñas Brito

Madrid, Julio 2023



# **ANÁLISIS DEL TRANSPORTE PÚBLICO TERRESTRE Y MEDIOS PARA SU DESCARBONIZACIÓN.**

**Autor: Bravo Bernal, Eva.**

Director: Mascareñas Brito, Alberto.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

**Palabras clave:** Descarbonización, transición energética, medio ambiente, transporte público, vehículos eléctricos, vehículos de celda de combustible.

### **1. Introducción**

La descarbonización del transporte público es fundamental para la transición energética y la lucha contra el Cambio Climático. La reducción de emisiones contaminantes, las cuales proceden mayoritariamente de este sector abarcando alrededor de un 25% del total [1], está en proceso tanto en España como en el resto de Europa. Varias medidas y compromisos a nivel medioambiental se están implementando en todo el mundo. Muchas nuevas tecnologías en desarrollo, y nuevos y más sostenibles combustibles, están entrando con gran fuerza en el mercado para quedarse.

Aunque, a pesar de los avances conseguidos hasta el momento, queda mucho camino por recorrer para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones y cumplir con los compromisos medioambientales. La colaboración entre el gobierno y las instituciones, empresas y la sociedad es imprescindible.

Específicamente, en este proyecto se trata la descarbonización de los autobuses urbanos de Madrid, se proponen varias alternativas y escenarios y se analizan con el fin de encontrar la mejor opción.

### **2. Descripción del proyecto.**

Este proyecto se centra en el estudio del cambio climático y en las emisiones de sustancias contaminantes producidas por el sector transporte, en concreto por el transporte terrestre. Se analiza cuáles son y que efectos tienen en la vida cotidiana de la sociedad y del planeta. También se estudian las posibles alternativas a los combustibles fósiles (electricidad, hidrógeno y biocombustibles), cómo funcionan y cómo se aplican en el transporte público con el objetivo de descarbonizarlo y hacerlo más sostenible. A mayores, se incluye un caso práctico en el que se determina qué escenario, situado en la ciudad de Madrid, sería mejor

en el año 2030 en cuanto a reducción de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) equivalente y en cuanto a minimización de costes: una flota de autobuses urbanos 100% eléctricos enchufables o 100% de celda de combustión de hidrógeno.

### **3. Metodología**

El proyecto consta de una primera parte de investigación bibliográfica, durante la cual se estudian exhaustivamente los siguientes temas: Cambio Climático y Calentamiento global, descarbonización del transporte y combustibles alternativos a los combustibles fósiles tradicionales, cómo funcionan y cómo se aplican al sector en la actualidad; junto con una segunda en la que se analiza un caso práctico ubicado en la ciudad de Madrid, en el cual se comparan dos escenarios en el 2030 con el real sucedido en 2021. Los casos estudiados son los siguientes:

- Caso Base: flota de autobuses urbanos de Madrid en el año 2021. 2.095 autobuses de los cuales, 1.642 son de Gas Natural Comprimido (GNC), 278 de diésel, 130 eléctricos enchufables y, 45 híbridos (GNC – eléctricos, GNC – diésel, eléctricos – diésel).
- Caso 1: flota de autobuses urbanos de Madrid en el año 2030. 2.369 autobuses 100% eléctricos enchufables.
  - Caso 1.a: situación optimista en la que el 74% de la energía eléctrica consumida es renovable [2]
  - Caso 1.b: situación realista en la que el 68% de la energía eléctrica consumida es renovable [3]
- Caso 2: flota de autobuses urbanos de Madrid en el año 2030. 2.369 autobuses eléctricos de celda de combustión de hidrógeno.
  - Caso 2 – azul: situación en la que la producción del hidrógeno es a partir de combustibles fósiles, pero con captura y almacenamiento de los gases emitidos [4]
  - Caso 2 – verde: situación en la que la producción del hidrógeno usado es de carácter renovable, a partir de energías limpias [4]

### **4. Resultados**

Los resultados del análisis de los tres escenarios se resumen en la Tabla 1. Se puede observar cómo, tanto en reducción de dióxido de carbono equivalente, como en minimización de



costes, la mejor alternativa es la propuesta en el caso 1, concretamente, en el caso 1.a, situación como ya se mencionó, más optimista.

También se calculan las emisiones del caso base, las cuales ascienden a un total de 372.229,89 toneladas de dióxido de carbono equivalente, dato que sirve de base para el cálculo de reducción de emisiones correspondiente a cada situación (Tabla 2).

	<b>Emisiones CO<sub>2</sub>e (Tm)</b>	<b>Coste (€)</b>
<b>Autobús eléctrico (Caso 1.a)</b>	77,13	13.298,80
<b>Autobús eléctrico (Caso 1.b)</b>	77,81	13.298,80
<b>Autobús H<sub>2</sub> (Caso 2 – azul)</b>	85,55	24.317,85
<b>Autobús H<sub>2</sub> (Caso 2 – verde)</b>	85,36	22.696,66

*Tabla 1: Resumen de resultados del caso práctico. Datos por autobús.*

	<b>Reducción de toneladas de CO<sub>2</sub>e total respecto al Caso base</b>
<b>Caso 1. a</b>	50,91%
<b>Caso 1. b</b>	50,48%
<b>Caso 2 - azul</b>	45,55%
<b>Caso 2 - verde</b>	45,67%

*Tabla 2: Resumen de reducción de emisiones con respecto al caso base.*

## **5. Conclusiones**

El presente trabajo permite al lector recrearse en la necesidad de un cambio urgente en el estilo de vida de la sociedad, haciendo evidente que se necesita una reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para que el planeta sobreviva en buenas condiciones.

Las alternativas contempladas ofrecen soluciones viables de cara a la descarbonización del transporte, siendo el uso de la electricidad la alternativa más eficaz y eficiente hasta el momento, ya sea por su mayor desarrollo frente a otras como por su integración en la sociedad actual. Afirmación que no solo es contrastada por fuentes bibliográficas, sino que también queda expuesta en los resultados del caso práctico analizado.

En resumen, el proyecto proporciona una visión general acerca de la descarbonización del transporte, y cómo el transporte público sostenible ocupa un muy importante lugar en la

lucha contra el cambio climático. Destaca también la necesidad de más desarrollo e investigación de tecnologías que permitan una reducción de sustancias contaminantes más eficiente.

## 6. Referencias

- [1] “Sector Transporte” Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, [en línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/transporte.aspx> [accedido el 3 de mayo de 2023]
- [2] “Plan Nacional Integrado de Energía y clima 2021-2030”, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/plan-nacional-integrado-energia-clima/plannacionalintegradodeenergiayclima2021-2030\\_tcm30-546623.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/plan-nacional-integrado-energia-clima/plannacionalintegradodeenergiayclima2021-2030_tcm30-546623.pdf) [accedido el 5 de junio de 2023]
- [3] L. Montes, “El horizonte de las renovables en España: un informe concluye que producirán el 68% de la energía en 2030 y más del 90% en 2050”, Business Insider, 2019, [en línea]. Disponible en: <https://www.businessinsider.es/renovables-produciran-68-energia-2030-90-2050-542001> [accedido el 5 de junio de 2023]
- [4] “¿Por qué Hidrógeno?”, Asociación Española del Hidrógeno (AeH<sub>2</sub>), [en línea]. Disponible en: <https://www.aeh2.org/hidrogeno/> [Accedido el 11 de junio de 2023]

# **ANALYSIS OF LAND PUBLIC TRANSPORT AND MEANS FOR ITS DECARBONIZATION**

**Author: Bravo Bernal, Eva**

Supervisor: Mascareñas Brito, Alberto.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas)

## **ABSTRACT**

**Keywords:** Decarbonization, energy transition, environment, public transportation, electric vehicles, fuel cell vehicles.

### **1. Introduction**

The decarbonization of public transport is essential for the energy transition and the fight against climate change. The reduction of pollutant emissions, which mainly come from this sector, accounting for about 25% of the total [1], is in process both in Spain and in the rest of Europe. Several environmental measures and commitments are being implemented worldwide. Many new technologies in development, and new and more sustainable fuels, are entering the market with great force to stay.

However, despite the progress made so far, there is still a long way to go to achieve emission reduction targets and meet environmental commitments. Collaboration between government, institutions, companies, and society are essential.

Specifically, this project deals with the decarbonization of Madrid's urban buses, proposing various alternatives and scenarios and analyzing them in order to find the best option.

### **2. Project description**

This project focuses on the study of climate change and emissions of pollutants produced by the transport sector, specifically by land transport. It analyzes what they are and what effects they have on the daily life of society and the planet. It also studies the possible alternatives to fossil fuels (electricity, hydrogen, and biofuels), how they work and how they are applied in public transport with the aim of decarbonizing it and making it more sustainable. In addition, a case study is included in which it is determined which scenario, located in the city of Madrid, would be better in 2030 in terms of CO<sub>2</sub> (carbon dioxide) equivalent reduction and cost minimization: a fleet of urban buses 100% plug-in electric or 100% hydrogen combustion cell.

### **3. Methodology**

The project consists of a first part of bibliographic research, during which the following topics are studied exhaustively: climate change and global warming, decarbonization of transport and alternative fuels to traditional fossil fuels, how they work and how they are applied to the sector today; together with a second part in which a practical case study located in the city of Madrid is analyzed, in which two scenarios in 2030 are compared with the real one that occurred in 2021. The cases studied are the following:

- Base Case: fleet of urban buses in Madrid in the year 2021. 2,095 buses of which 1,642 are Compressed Natural Gas (CNG), 278 diesel, 130 plug-in electric and 45 hybrids (CNG - electric, CNG - diesel, electric - diesel).
- Case 1: Madrid's urban bus fleet in 2030. 2,369 100% plug-in electric buses.
  - Case 1.a: optimistic situation in which 74% of the electrical energy consumed is renewable [2].
  - Case 1.b: realistic situation in which 68% of the electrical energy consumed is renewable [3].
- Case 2: Madrid's urban bus fleet in 2030. 2369 hydrogen combustion cell electric buses.
  - Case 2 - blue: situation in which hydrogen production is sourced from fossil fuels, but with capture and storage of the gases emitted [4].
  - Case 2 - green: situation in which the hydrogen production comes from renewable sources, from clean energies [4].

#### **4. Results**

The results of the analysis of the three scenarios are summarized in Table 1. It can be seen how, both in terms of equivalent carbon dioxide reduction and cost minimization, the best alternative is the one proposed in case 1, specifically, in case 1.a, the most optimistic situation, as already mentioned.

The base case emissions are also calculated, which amount to a total of 372,229.89 tons of equivalent carbon dioxide, which serves as the basis for the calculation of emissions reduction corresponding to each situation (Table 2).

	CO <sub>2</sub> e emissions (Tm)	Cost (€)
<b>Electric bus (Case 1.a)</b>	77.13	13,298.80
<b>Electric bus (Case 1.b)</b>	77.81	13,298.80
<b>H2 bus (Case 2 – blue)</b>	85.55	24,317.85
<b>H2 bus (Case 2 – green)</b>	85.36	2,696.66

*Table 1: Summary of case study results. Data per-bus.*

	Reduction of total tons of CO <sub>2</sub> e compared to Base Case
<b>Case 1. a</b>	50.91%
<b>Case 1. b</b>	50.48%
<b>Case 2 - blue</b>	45.55%
<b>Case 2 - green</b>	45.67%

*Table 2: Summary of emission reductions compared to the base case.*

## 5. Conclusions

This work allows the reader to recreate the need for an urgent change in society's lifestyle, making it evident that a reduction in Greenhouse gas (GHG) emissions is necessary for the planet to survive in good conditions.

The alternatives contemplated offer viable solutions for the decarbonization of transport, with the use of electricity being the most effective and efficient alternative so far, either because of its greater development compared to others or because of its integration into today's society. This affirmation is not only contrasted by bibliographic sources, but is also shown in the results of the case study analyzed.

In summary, the project provides an overview of the decarbonization of transport, and how sustainable public transport has a very important place in the fight against climate change. It also highlights the need for further development and research into technologies that enable a more efficient reduction of pollutants.

## 6. References

- [1] “Sector Transporte” Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, [online]. Available at: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio->

climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/transporte.aspx [accessed May 3, 2023]

- [2] “Plan Nacional Integrado de Energía y clima 2021-2030”, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020. Available at: [https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/plan-nacional-integrado-energia-clima/plannacionalintegradodeenergiayclima2021-2030\\_tcm30-546623.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/plan-nacional-integrado-energia-clima/plannacionalintegradodeenergiayclima2021-2030_tcm30-546623.pdf) [accessed Jun 5, 2023]
- [3] L. Montes, “El horizonte de las renovables en España: un informe concluye que producirán el 68% de la energía en 2030 y más del 90% en 2050”, Business Insider, 2019, [online]. Available at: <https://www.businessinsider.es/renovables-produciran-68-energia-2030-90-2050-542001> [accessed Jun 5, 2023]
- [4] “¿Por qué Hidrógeno?”, Asociación Española del Hidrógeno (AeH<sub>2</sub>), [online]. Available at: <https://www.aeh2.org/hidrogeno/> [accessed Jun 11, 2023]

## Índice de la memoria

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>5</b>
1.1 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	7
<b>Capítulo 2. Cambio climático .....</b>	<b>9</b>
2.1 El efecto invernadero .....	9
2.2 El calentamiento global .....	10
2.3 Los gases de efecto invernadero .....	12
2.3.1 Vapor de agua .....	12
2.3.2 Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	12
2.3.3 Metano (CH <sub>4</sub> ) .....	12
2.3.4 Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O) .....	13
2.3.5 Gases fluorados .....	13
2.3.6 Ozono troposférico .....	13
2.4 La huella de carbono .....	13
2.5 Efectos del cambio climático .....	13
2.5.1 Efectos del cambio climático en España .....	14
2.6 Acuerdos contra el cambio climático .....	15
2.6.1 El Protocolo de Kioto .....	15
2.6.2 El Acuerdo de París .....	16
2.6.3 El Pacto Verde Europeo .....	17
2.6.4 La Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible .....	18
2.6.5 Política Nacional sobre el cambio climático .....	18
<b>Capítulo 3. Descarbonización .....</b>	<b>20</b>
3.1 Definición .....	20
3.2 Energías renovables .....	20
3.3 Descarbonización del transporte .....	22
3.3.1 La descarbonización del transporte en España .....	23
3.4 Combustibles fósiles – Alternativas .....	25
3.4.1 La electricidad .....	26
3.4.2 Biocombustibles .....	32
3.4.3 Hidrógeno .....	35

<b>Capítulo 4. Caso Práctico – análisis de escenarios .....</b>	<b>42</b>
4.1 Introducción .....	42
4.2 Cálculos.....	43
4.2.1 Análisis de reducción de emisiones.....	44
4.2.2 Análisis económico.....	63
4.3 Resultados .....	67
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>70</b>
<b>Capítulo 6. Bibliografía.....</b>	<b>72</b>



## *Índice de figuras*

Figura 1: Porcentaje de emisiones de GEI en Europa en 2019 por tipo de vehículo[3][4] ...	6
Figura 2: Cómo funciona el efecto invernadero. Elaboración propia [6].	9
Figura 3: Dióxido de carbono emitido por sector en España (2021). Elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística [9].	10
Figura 4: Índice de evolución del agregado de emisiones de 1990 a 2021 en la U.E [10].	11
Figura 5: Estructura de generación de energía eléctrica según fuente empleada (2022). [28]	21
Figura 6: Línea temporal de países que eliminarán la venta de vehículos diésel y gasolina. Elaboración propia. [30]	23
Figura 7: Evolución de emisiones GEI en el sector transporte español. Transporte vs. transporte terrestre. Elaboración propia con datos de European Environment Agency [33]	24
Figura 8: Matriculación de autobuses según tipo de combustible en España en 2022. Elaboración propia [52]	31
Figura 9: Proceso de fabricación del bioetanol. Elaboración propia [57].	33
Figura 10: Origen del hidrógeno producido en la actualidad [70].	37
Figura 11: Los colores del hidrógeno. [71]	39
Figura 12: Cómo funciona una pila de combustible. [75]	40
Figura 13: Consumo de combustible según temperatura media diaria. [93]	60
Figura 14: Consumo de combustible según época del año. [93]	60
Figura 15: Precio de producción del hidrógeno por tipo y año. Elaboración propia [99] ....	64

## *Índice de tablas*

Tabla 1: Resumen de resultados del caso práctico. Datos por autobús. ....	9
Tabla 2: Resumen de reducción de emisiones con respecto al caso base. ....	9
Tabla 3: Tipos de biocombustibles. Elaboración propia [61]. ....	34
Tabla 4: Procesos de obtención del hidrógeno según el tipo de energía y fuente empleadas. Elaboración propia [69]. ....	36
Tabla 5: Cantidad de autobuses de MadridEMT según combustible (2021). Elaboración propia [81]. ....	45
Tabla 6: Datos de referencia del Caso Base. Elaboración propia [81]. ....	46
Tabla 7: Cálculos de consumos de los híbridos en el Caso Base ....	46
Tabla 8: Consumos específicos de cada combustible del Caso Base ....	47
Tabla 9: Emisiones de autocares de GNC en 2021. ....	50
Tabla 10: Emisiones de autocares de diésel en 2021. ....	50
Tabla 11: Características de los autobuses de 2021. ....	51
Tabla 12: Características de los autobuses de 2030. ....	52
Tabla 13: Factores de emisión por fabricación, mantenimiento y reciclaje en 2021. ....	53
Tabla 14: Factores de emisión por fabricación, mantenimiento y reciclaje en 2030. ....	53
Tabla 15: Datos de referencia del caso 1. ....	56
Tabla 16: Consumo de electricidad según fuente y situación. ....	57
Tabla 17: Datos de referencia para el caso 2. ....	61
Tabla 18: Emisiones según procedencia del hidrógeno. Elaboración propia [94][95]. ....	62
Tabla 19: Coste total por combustible en cada caso. ....	65
Tabla 20: Coste total por mantenimiento en cada caso. ....	66
Tabla 21: Coste total de la flota por caso. ....	66
Tabla 22: Resultados de emisiones del caso base. ....	67
Tabla 23: Resultados de emisiones del caso 1. ....	67
Tabla 24: Resultados de emisiones del caso 2. ....	68
Tabla 25: Resultados del análisis económico de todos los casos. ....	68

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

El cambio climático y el calentamiento global son dos sucesos muy al día en la sociedad actual. Es importante tenerlos presentes en los avances tecnológicos y, sobre todo, a la hora de decidir qué camino seguir, el de la sostenibilidad y el cambio a mejor para que las generaciones futuras disfruten de la vida en la tierra, o si, por el contrario, aquel que solo hace que destrozarnos nuestro planeta.

El aumento de la temperatura media de la tierra es un hecho que afecta, tanto la salud de las personas como la del globo y otros seres vivos, por lo que la necesidad de reducir la presencia de sustancias contaminantes en la atmósfera, provocadoras de este aumento, es fundamental. Para hacer frente a esta situación tan problemática, varios organismos internacionales (como, por ejemplo: la Organización de las Naciones Unidas o la Unión Europea), junto con otros nacionales y locales, han establecido numerosos acuerdos y planes de acción con el objetivo de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para mejorar la calidad de vida de las personas.

El transporte es una de las mayores fuentes de emisiones GEI del mundo. En 2018, fue responsable del 23% de emisiones de CO<sub>2</sub> y del 32% del consumo total de energía mundialmente [1]. Asimismo, dentro del sector transporte, las emisiones asociadas al transporte terrestre representan la mayor parte del total. En Europa en 2019, el 71,1% de las emisiones producidas provenían del transporte por carretera (Figura 1), siendo el coche el vehículo con mayor representación [2].

Por lo tanto, la descarbonización del transporte es un paso indispensable para lograr los objetivos de la Unión Europea para 2030, que buscan reducir en al menos un 50% los niveles de emisiones de GEI de 1990; para que, consecuentemente, se alcance en el año 2050 la neutralidad climática, es decir, para conseguir que las emisiones netas de gases de efecto invernadero sean igual a cero [3].

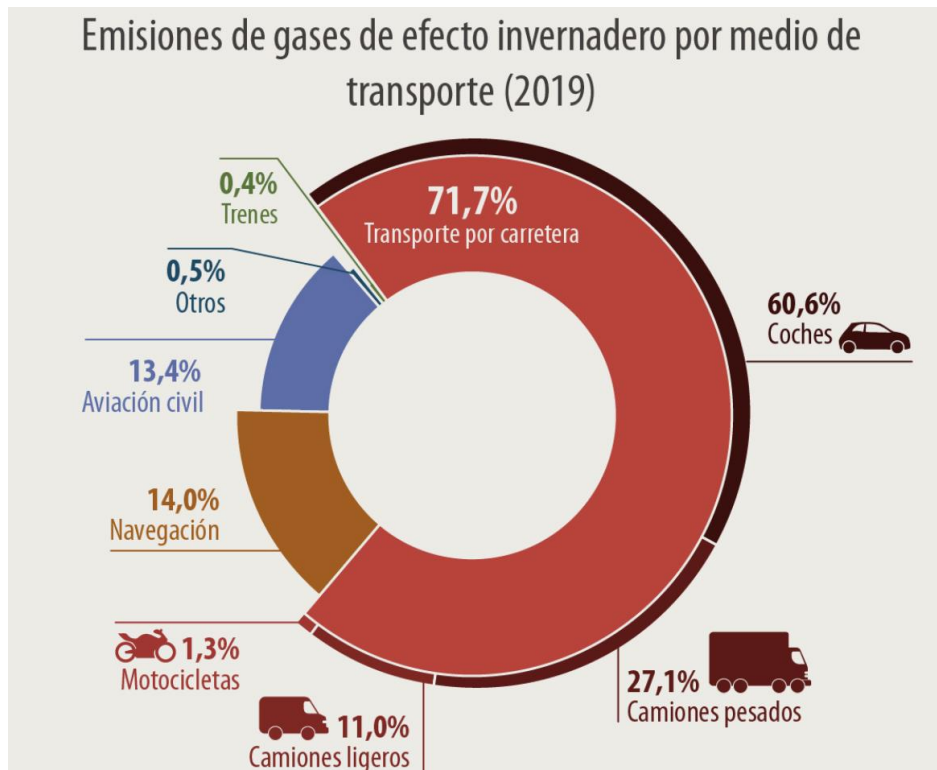


Figura 1: Porcentaje de emisiones de GEI en Europa en 2019 por tipo de vehículo[3][4]

En este trabajo se aborda detalladamente estos temas, sobre cómo influyen en el día a día de las personas y sobre qué medidas existen para mitigar sus efectos. Concretamente, se trata la reducción de emisiones de GEI en el sector transporte público terrestre. También se analizan las posibles alternativas a los combustibles fósiles más comunes hoy en día, como pueden ser la electricidad, el hidrógeno y los biocombustibles, así como su aplicación actual al transporte público en España y en el mundo.

Uno de los objetivos es comprender qué causa esta situación y que se puede hacer para reducirla o eliminarla, así como aprender qué medidas se están tomando al respecto. Se estudian los combustibles fósiles y sus alternativas, como funcionan y como se implementan.

Por último, se realiza un análisis de tres escenarios, uno en la actualidad (que servirá como base para la comparación) y otros dos en el futuro (2030), uno que contempla una flota de autobuses 100% eléctricos, y otro que contempla una flota de autobuses 100% eléctricos de

celda de combustible de hidrógeno. Todos ubicados en la ciudad de Madrid y acerca de la flota de autobuses municipales perteneciente a la empresa EMT Madrid.

El análisis tiene como objetivo determinar cuál de los dos casos permite una mayor reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en la atmósfera, y conocer y determinar los costes asociados específicos de cada situación, para así poder determinar un punto óptimo entre ambos.

## ***1.1 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE***

Debido a la naturaleza del proyecto, los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por la ONU en 2015, con el objetivo de cumplirse en la Agenda 2030, están muy presentes. La información presentada en este apartado procede de [5] y de forma resumida de la memoria del Anexo B realizada por la misma autora.

Los objetivos más relacionados con la temática de este proyecto son:

- *Objetivo 13: Acción por el clima. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.* El cambio climático consiste en el efecto que producen los gases de efecto invernadero en la atmósfera. La descarbonización del transporte ayudará en la reducción de CO<sub>2</sub> en el ambiente que, consecuentemente, ayudará en la reducción de la temperatura del planeta, disminuyendo así el efecto del cambio climático sobre la tierra.
- *Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles. Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.* Principalmente por la parte de sostenibilidad, cuya meta es reducir el impacto medioambiental negativo per cápita en las ciudades. Meta que se consigue, en parte, con la eliminación y/o reducción de la presencia de CO<sub>2</sub> en el aire.

Otros objetivos también relacionados, aunque de forma más indirecta son:

- *Objetivo 3.* Con respecto a la salud y el bienestar.

- *Objetivo 6.* Una de las metas contempladas en este objetivo habla de la posibilidad de mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación.
  
- *Objetivo 7.* La ONU ha propuesto aumentar la cooperación internacional con el fin de facilitar y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias.
  
- *Objetivo 9.* Uno de los fines de este objetivo promueve el desarrollo de nuevas tecnologías y procesos industriales más limpios.
  
- *Objetivo 12.* Búsqueda del empleo y uso eficiente de recursos naturales, como la energía eólica o solar, que podría ser empleada para la generación de electricidad en las electrolineras.
  
- *Objetivo 14 y Objetivo 15.* De manera indirecta, la eliminación de la huella de carbono del planeta mejoraría, en general, el estado de los ecosistemas, de la flora y de la fauna.

## Capítulo 2. CAMBIO CLIMÁTICO

### 2.1 EL EFECTO INVERNADERO

El efecto invernadero es el fenómeno que se encarga de que la tierra sea habitable, manteniendo su temperatura en un nivel adecuado para que seres vivos no tengan problemas para vivir. Este suceso se produce cuando las longitudes de onda de la radiación infrarroja solar más cortas son absorbidas por un ‘obstáculo’ (gases presentes en la atmósfera), mientras que las radiaciones más largas atraviesan este ‘obstáculo’ para luego volver a ser irradiadas por el mismo en todas las direcciones. Esta re-irradiación no puede volver a atravesar este ‘obstáculo’, por lo que se queda atrapada en la atmósfera, propiciando un aumento de la temperatura de la tierra. La existencia de este fenómeno es realmente importante para la vida en el globo terráqueo, ya que, sin él, la temperatura de la tierra sería de media, unos 18 grados centígrados bajo cero, y sería imposible sobrevivir para los seres humanos[6].

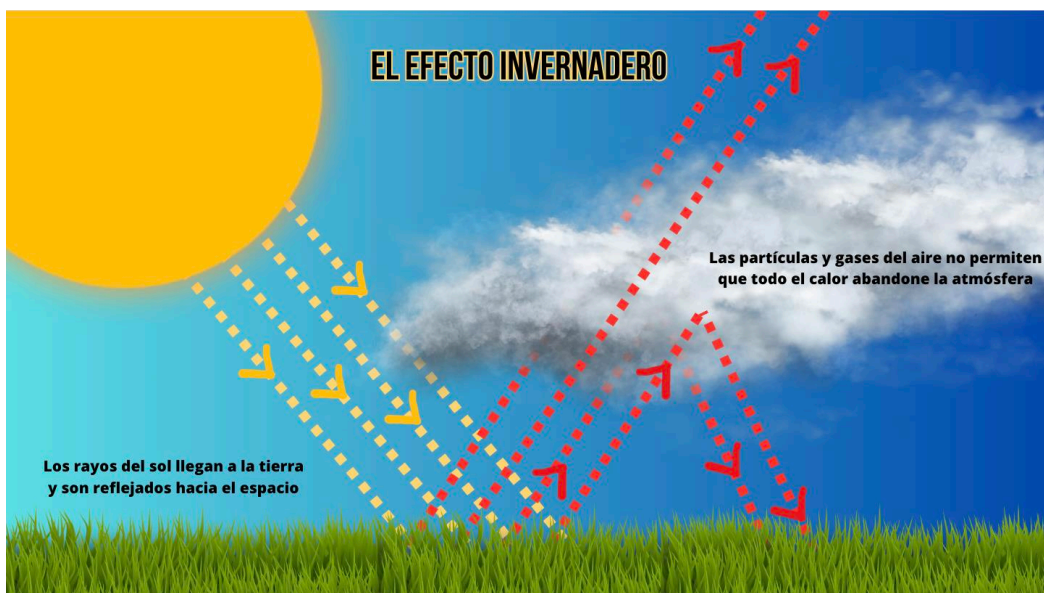


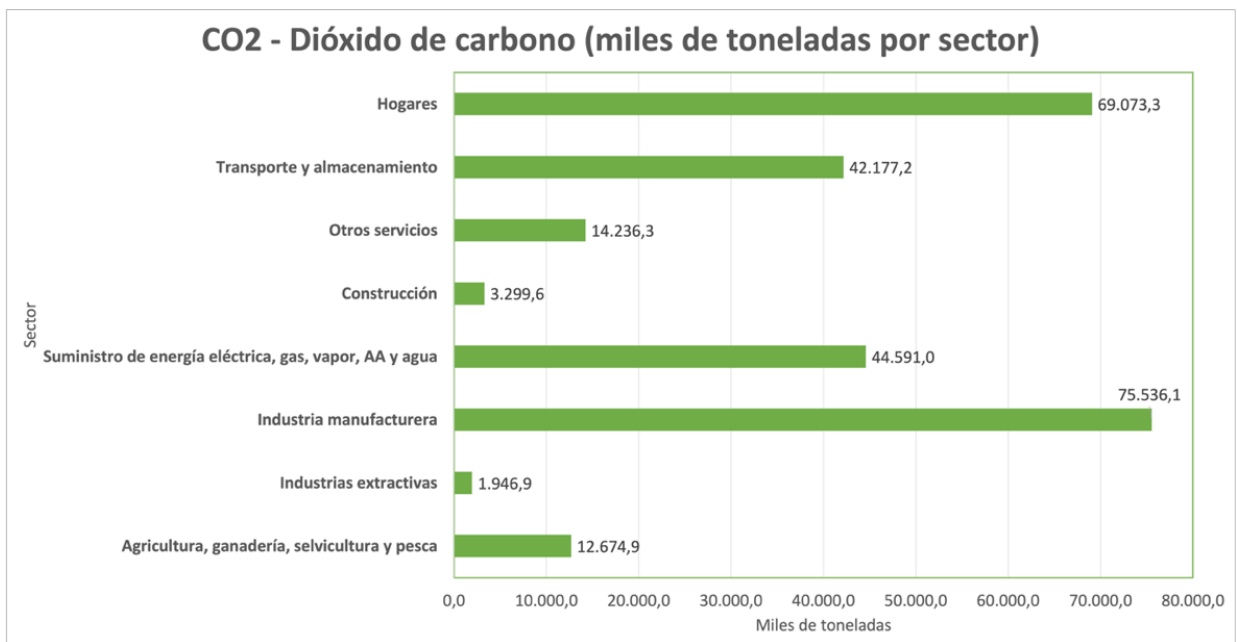
Figura 2: Cómo funciona el efecto invernadero. Elaboración propia [6].

En la Figura 2 se puede observar un breve esquema explicativo de este fenómeno. Se ve como algunos de los rayos del sol quedan atrapados entre las ‘nubes’ o gases (el obstáculo del que se hablaba antes) y el suelo.

Si bien el efecto invernadero es necesario para habitar en la tierra, un exceso de presencia de algunos gases puede causar otros efectos adversos, de los cuales se hablará posteriormente.

## 2.2 EL CALENTAMIENTO GLOBAL

El calentamiento global es el crecimiento de la temperatura media de la tierra, y es fruto del aumento de la presencia de gases de efecto invernadero, que afectan de manera directa a la atmósfera, acumulándose y captando energía infrarroja del sol. Estos gases son emitidos a la atmósfera como resultado de la actividad humana o animal, la cual se puede presentar de forma natural y/o antropogénica. Todo esto contribuye al cambio climático, que se define según la Organización de las Naciones Unidas como “los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos” [7][8].



*Figura 3: Dióxido de carbono emitido por sector en España (2021). Elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística [9].*

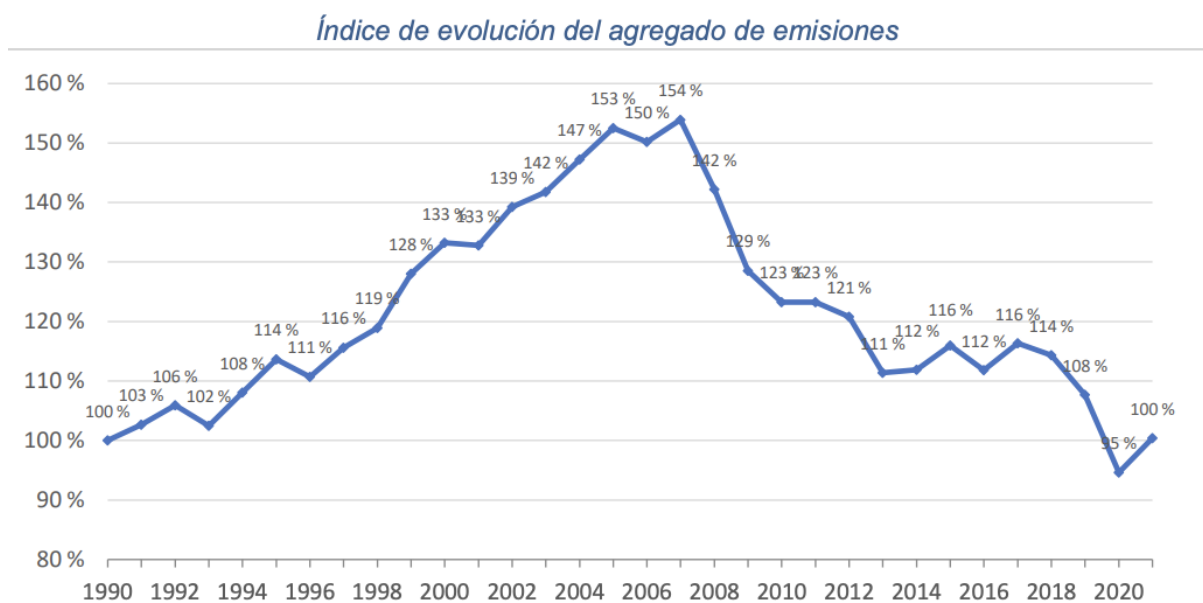


En la Figura 3 se puede observar una comparación de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera por cada sector en España.

Cabe destacar que en el año 2021 (año más reciente del que se tienen datos), las emisiones de gases de efecto invernadero aumentaron en un 5,7%, de las cuales, las de dióxido de carbono aumentaron un 7,1% respecto a 2020.

Según la ONU [8], las emisiones disminuyeron considerablemente en 2020 debido a la reducción de actividad causada por la pandemia. Sin embargo, en 2021 estos niveles superaron incluso los máximos de 2019, que ya habían sido un 54% más altos que en el año 1990, año de base para el cálculo de reducción de emisiones en la Unión Europea.

En la Figura 4 se muestra como ha ido evolucionando las emisiones de gases total en España desde 1990.



*Figura 4: Índice de evolución del agregado de emisiones de 1990 a 2021 en la U.E [10].*

## **2.3 LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO**

Los principales gases de efecto invernadero son: el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso, los gases fluorados y el ozono troposférico. A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno.

### **2.3.1 VAPOR DE AGUA**

Es el gas de efecto invernadero mayoritario del planeta. Está menos estudiado que el resto de los gases ya que no se emite directamente por culpa de la actividad humana, si no por la evaporación natural [11].

### **2.3.2 DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)**

Es el gas que más asociado está a la actividad humana, y uno de los gases más sustanciales en el calentamiento global junto con el vapor de agua. Puede proceder de fuentes naturales o humanas. Con respecto a la vida humana, el CO<sub>2</sub> proviene de la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural, y todos sus derivados) y leña. Dentro de la naturaleza, este gas juega un papel fundamental en un gran número de procesos biológicos. [11]

### **2.3.3 METANO (CH<sub>4</sub>)**

El metano se emite a raíz de varias acciones, principalmente de origen humano, y finalmente se convierte en dióxido de carbono cuando se elimina de la atmósfera por reacción con radicales de hidroxilo. [7][11]

Algunas de las actividades que más fomentan su aparición son:

- Descomposición de materia orgánica [7][11].
- Producción y distribución de gas natural y del petróleo [7][11].
- En la explotación de carbón mineral [7].
- La descomposición de residuos de casas [7].

### **2.3.4 ÓXIDO NITROSO (N<sub>2</sub>O)**

Este gas procede principalmente de la agricultura, del uso de fertilizantes para enriquecer el suelo explotado. También se asocia al uso de combustibles fósiles y a la descomposición de aguas residuales. [11]

### **2.3.5 GASES FLUORADOS**

Grupo en el que se incluye los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC), el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), el trifluoruro de nitrógeno (NF<sub>3</sub>) y los clorofluorocarbonos (CFC). Estos son mucho más potentes en emisión de calor que el dióxido de carbono. Son compuestos artificiales y provienen de la explotación industrial. [7][12]

### **2.3.6 OZONO TROPOSFÉRICO**

El ozono troposférico, que no se debe confundir con el ozono estratosférico (encargado de proteger el planeta tierra de los rayos ultravioletas del sol), es un gas que se produce a partir de una reacción química y que afecta a la respiración de los seres vivos, además de al calentamiento global. [11]

## **2.4 LA HUELLA DE CARBONO**

Otro termino importante es la huella de carbono, que consiste en la cantidad de gases de efecto invernadero que se emiten a la atmosfera debido al ser humano; también podemos hablar de la huella de carbono personal, que es el rastro de gases que deja una persona a lo largo de su vida simplemente por el hecho de vivir y realizar actividades cotidianas y no tan cotidianas. [13]

## **2.5 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

Por lo tanto, y debido a todo lo explicado anteriormente, hoy en día estamos experimentando el fenómeno del cambio climático, el cual concierne aquellos cambios a largo plazo de las condiciones climáticas y de las temperaturas. Ya se ha hablado del efecto invernadero, del

calentamiento global y de sus respectivas causas, ya que son los principales sucesos causantes de este suceso, que tiene muchas consecuencias negativas para los todos sistemas biológicos, naturales y humanos [8].

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), los impactos del cambio climático ya son muy perceptibles en la vida de las personas. Algunos de los efectos más conocidos son [8]:

- El ascenso de la temperatura media de la tierra.
- El aumento de situaciones extremas, como la sequía o las inundaciones.
- El deshielo del Ártico.
- La subida del nivel del mar.
- Los ataques de insectos o las plagas.
- Los incendios forestales.

Estas consecuencias afectan a cada uno de los rincones del planeta tierra, siendo el nivel de dureza diferente en cada lugar. Se sabe que acarreará duras consecuencias no solo para la salud de las personas, sino también para la agricultura [8].

### **2.5.1 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA**

Asimismo, en España se han detectado principalmente las siguientes consecuencias: alargamiento del verano, la reducción del caudal de los ríos, el aumento de territorio con clima característico árido y el crecimiento del número de olas de calor que sufre el país al año. Además, de cara al futuro, muchos científicos han estudiado cómo podría cambiar el clima terrestre, con foco en España: disminución moderada de precipitaciones y nubosidad, todavía mayor aumento de temperaturas máximas y mínimas, aumento de la duración y aparición de los períodos de sequía, y aumento del número de olas de calor, siendo más largas y frecuentes cada vez. [14]

La zona del Mediterráneo se encuentra en el mapa de las áreas más vulnerables ante la crisis climática, siendo una de las zonas más afectadas. Las sequías, la falta de agua dulce y el

aumento del nivel del mar contribuyen al aumento de la temperatura de sus aguas, lo que tiene un impacto especialmente severo en esta región [15].

El IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) prevé un aumento significativo de las sequías: se espera que las lluvias disminuyan un 4 % por cada grado de aumento de la temperatura, lo que implica una disminución del 5 al 20 % según nuestra capacidad para disminuir emisiones. También explica la posible asimetría presente en la vulnerabilidad de esta zona, ya que los indicadores en términos de pobreza, agua, educación o salud, entre otros, difieren mucho de la costa sur a la costa norte. [15]

António Guterres, secretario general de la Organización de las Naciones Unidas, cree que los datos del informe más reciente del IPCC deberían tenerse en cuenta como una advertencia de que el planeta está en peligro y, por lo tanto, la existencia humana también [15].

## **2.6 ACUERDOS CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO**

Actualmente en el mundo hay en marcha varios planes de acción internacionales que buscan soluciones que disminuyan las emisiones de CO<sub>2</sub> y otras sustancias contaminantes para frenar el cambio climático: el Protocolo de Kioto, el Acuerdo de París, La Agenda 2030 del desarrollo sostenible con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC), El pacto verde europeo... entre otros planes y políticas nacionales propias de cada país.

### **2.6.1 EL PROTOCOLO DE KIOTO**

El protocolo de Kioto es un tratado de carácter internacional que nace en el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, y que fue ratificado por la Unión Europea (que en este caso participa en el protocolo como una organización común independiente de sus estados miembros) además de por un total de 191 países del resto del mundo [16].

El principal objetivo es la reducción de emisiones de los principales gases de efecto invernadero producidos por la actividad humana. Estos son, según el protocolo: dióxido de carbono, metano, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, hexafluoruro de azufre, y óxido nitroso. Fue adoptado en el año 1997 pero no se implementó hasta el 2005. Lo interesante de este protocolo es que establece, por primera vez, metas vinculantes y medibles sobre la reducción de las emisiones por parte de países desarrollados que todos acuerdan cumplir. Además, también supone un compromiso para ayudar a conseguir un proceso de desarrollo sostenible y sustentable de aquellos países aún en vías de desarrollo [17]. Algunos de los acuerdos más característicos del protocolo son:

- Ayudar a países en vías de desarrollo en el empleo de nuevas tecnologías y procesos de industrialización de emisiones reducidas [16].
- Reducir en una cantidad concreta las emisiones de GEI de cada país. Por ejemplo, en Europa la meta era alcanzar una reducción del 7% para el año 2012 [16].

El “problema” de este acuerdo es que había países implicados que no estaban obligados a cumplir con los objetivos establecidos, haciendo imposible el cumplimiento de este protocolo en su totalidad. Con el fin de superar estas limitaciones y conseguir una reducción de emisiones real y eficaz, nació el Acuerdo de París. [18]

Aunque el protocolo de Kioto sigue en vigor, el anterior periodo de compromiso terminó a finales de 2020, cuando se dio paso al anteriormente mencionado acuerdo de París, el cual establece nuevas metas para los mismos objetivos [19].

## **2.6.2 EL ACUERDO DE PARÍS**

El acuerdo de París nació en 2015 con la intención de intensificar y ampliar las medidas tomadas hasta el momento en contra del cambio climático, así como acelerar la inversión necesaria para su cumplimiento. Fue firmado por 194 participantes. [20]

El objetivo principal se centra en evitar que el aumento de la temperatura media global supere los dos grados centígrados, intentado incluso que no sobrepase los 1,5 grados. Otra de las metas de este acuerdo reside en mejorar la capacidad de adaptación a los impactos

producidos por el cambio climático, lo que implica desarrollar nuevas y efectivas estrategias que sirvan para hacer frente a los posibles efectos negativos del cambio climático en los diferentes sectores (agricultura, salud, ecosistemas, infraestructuras, etc.). [20]

Es importante resaltar que el acuerdo de París se basa en contribuciones nacionales determinadas (NDC, por sus siglas en inglés), a partir de las cuales los países establecen sus propias metas de reducción de gases y los métodos que se emplearán para su alcance. Además, los países se comprometen a revisar los avances y renovar los compromisos, en caso de que sea necesario, cada cinco años. [20]

### **2.6.3 EL PACTO VERDE EUROPEO**

El Pacto verde es un conjunto de iniciativas de carácter político tomadas en todos los países de Europa con el principal objetivo de transformar la economía europea a una más sostenible y respetuosa con el medio ambiente, para así convertir en climáticamente neutral a toda Europa. Es una respuesta a la emergencia medioambiental y climática. El pacto se considera la estrategia que toma Europa para conseguir los objetivos establecidos en el acuerdo de París. [21]

Mediante la legislación europea del clima, se consigue que los objetivos del pacto verde y del acuerdo de París sean de obligado cumplimiento jurídico por los países europeos. Estos se han comprometido a reducir en al menos un 55% las emisiones de gases hasta el año 2030 [21]. Algunas de las medidas tomadas para el cumplimiento de este compromiso según [21] son:

- La planificación de la regularidad de reducción de emisiones.
- El desarrollo de un sistema de comprobación, para poder medir cómo y cuánto se están cumpliendo los objetivos.
- Cerciorar la justicia y rentabilidad de la transición ecológica.

## **2.6.4 LA AGENDA 2030 DE DESARROLLO SOSTENIBLE**

La Agenda de Desarrollo Sostenible 2030 es un plan de acción global adoptado por los Estados Miembros de las Naciones Unidas en septiembre de 2015, que establece un conjunto de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 metas para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos. [5]

En el apartado *Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible*, se explica la relación de este proyecto con los objetivos de desarrollo de la Agenda 2030.

## **2.6.5 POLÍTICA NACIONAL SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

Las políticas nacionales sobre el cambio climático son un conjunto de intervenciones públicas desarrolladas por los gobiernos de cada país, que tienen por objetivo garantizar la protección del medio ambiente reduciendo las emisiones de GEI producidas en su país, para así conseguir una economía baja o incluso nula en carbono. [22]

### ***2.6.5.1 Política Nacional Española***

En España existen varias iniciativas en la lucha contra el cambio climático. Algunas de las más importantes son:

- Proyecto de Ley de cambio climático y transición energética. En España los objetivos de reducción de emisiones de GEI se establecieron como ley en mayo de 2020, decretando que la reducción para el año 2030 debía ser de al menos un 20% con respecto al año 1990. Esta ley proporciona un objetivo muy claro, que es alcanzar la neutralidad climática, como se indica en el Acuerdo de París, para el año 2050, consiguiendo de esta manera reforzar el compromiso de Europa para con el resto de los países parte del acuerdo. [23]
- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC). Existe, además, un plan de carácter nacional que es clave en la implementación de la ley de cambio climático y transición energética, cuyos objetivos concuerdan y se centran en la ansiada reducción de emisiones GEI además de en el desarrollo sostenible, la mejora de la



eficiencia energética y la promoción del uso de energías renovables por encima de las energías de origen fósil. [24]

- Medidas de la Unión Europea. España, además, como estado miembro de la Unión Europea, debe responder antes las medidas y legislaciones propias de esta materia impuestas por esta.

## **Capítulo 3. DESCARBONIZACIÓN**

### **3.1 DEFINICIÓN**

La descarbonización puede definirse como un proceso de reducción de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera debido a la quema de combustibles fósiles por parte de acción humana. Para lograr la descarbonización hace falta eliminar el carbono de la producción de energía, es decir, ‘limpiar’ la economía cambiando el uso de energía contaminantes por energía limpias que no emitan dióxido de carbono o que, al menos, emitan solo aquella cantidad que el planeta tierra es capaz de tolerar. [25]

### **3.2 ENERGÍAS RENOVABLES**

La descarbonización guiará hacia una economía verde, donde los recursos renovables predominarán frente a los combustibles fósiles. Además de la reducción del cambio climático, el uso de energías renovables presenta un gran número de ventajas, entre las cuales, según [26], destacan las siguientes:

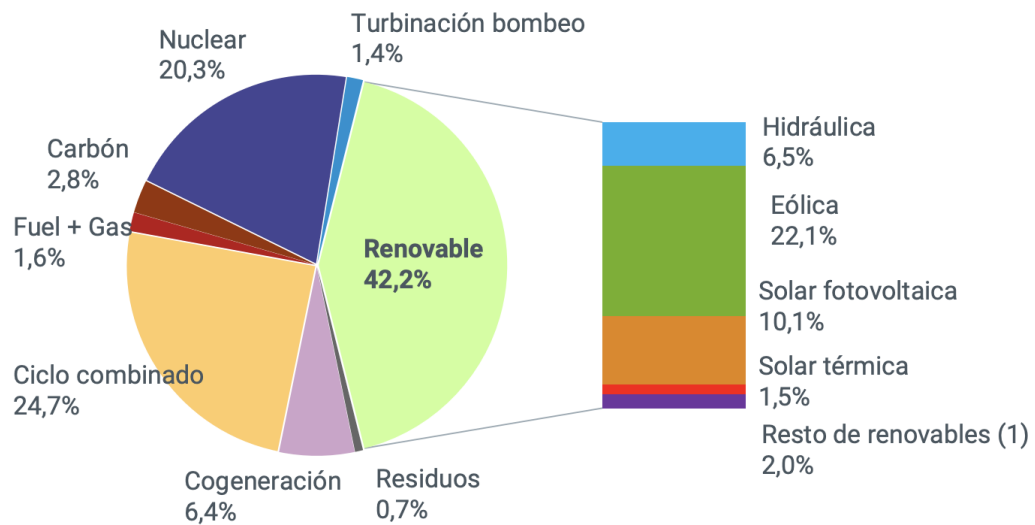
1. Respetan el medio ambiente, la gran mayoría de estas energías no produce casi o nada de emisiones contaminantes.
2. Consecuentemente, también son más respetuosas con la salud de las personas y otros seres vivos.
3. No producen residuos difíciles de tratar.
4. Son ilimitadas, provienen de recursos naturales que no se acaban.
5. Son flexibles con respecto a la ubicación de su instalación.
6. Crean muchos más puestos de trabajo que los otros métodos de obtención de energía.
7. Promueven la autonomía energética.

En España el sector energético es el que más emisiones aporta, por lo que el empleo de fuentes renovables para la obtención de este tipo de energía es imprescindible en el camino

hacia un país descarbonizado. Además, este tipo de energía no solo reduce las sustancias contaminantes de la atmosfera, sino que también reduce la dependencia energética, promoviendo y garantizando el abastecimiento propio. Hoy en día, España se sitúa dentro de los 15 países que más energías renovables consume, alcanzando alrededor de un 20,7 % de consumo bruto renovable en el año 2023. [27]

En el sector energía eléctrica es en el que más avanzados en materia de energías renovables nos encontramos. En la Figura 5 se muestra la estructura de generación de energía eléctrica en función de la fuente empleada para tal caso del país. Se puede observar como la generación procedente de fuentes renovables ascendió a un 42,4% en el año 2022, dentro de la cual, la potencia eólica se ha convertido en la energía predominante y más importante del mix energético renovable español, suponiendo 22,1% del total. [28]

### Estructura de generación de energía eléctrica (%)



(1) Incluye biogás, biomasa, geotérmica, hidráulica marina, hidroeólica y residuos renovables.

*Figura 5: Estructura de generación de energía eléctrica según fuente empleada (2022). [28]*

### **3.3 DESCARBONIZACIÓN DEL TRANSPORTE**

La descarbonización del transporte es un proceso mediante el cual se pretende reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente las de dióxido de carbono, emitidas por los vehículos. El transporte, tanto de personas como de mercancías, es uno de los sectores más contaminantes en todo el mundo, por lo que tomar medidas para que sea más limpio es muy importante de cara a reducir los efectos del cambio climático. [29]

Una de las medidas impuestas en muchas partes del mundo es la prohibición de ventas de vehículos diésel y gasolina. En la Figura 6 se muestra una línea del tiempo con algunos de los países más comprometidos con la medida, inspirada en [30].

- 2025: Noruega
- 2030: Eslovenia, Israel, Finlandia, Irlanda, Dinamarca, Países Bajos y Suecia
- 2032: Escocia
- 2035: Reino Unido y Cabo Verde
- 2040: Sri Lanka, Portugal, España, Francia y China
- 2050: Estados Unidos, Japón, Costa Rica y Alemania

Las políticas públicas se consideran fundamentales para conseguir la descarbonización del transporte, ya que sirven para promocionar e incentivar la transición hacia un modelo de transporte sostenible. También son útiles para promover el uso de combustibles alternativos en los transportes de personas y de mercancías. Algunas de estas políticas son: restricciones de circulación a vehículos más contaminantes y fomento de medios de transporte alternativos como bicicletas; aplicación de nuevas tecnologías y avances tecnológicos para afrontar los posibles desafíos de la descarbonización, como la promoción de movilidad compartida y la implementación de sistemas inteligentes de transporte; renovación de flotas de vehículos a unas más limpias y eficientes tanto en el transporte público, privado, colectivo o de mercancías, con financiamiento y otros incentivos fiscales; y, promoción de combustibles alternativos como la electricidad o el hidrógeno. [31]

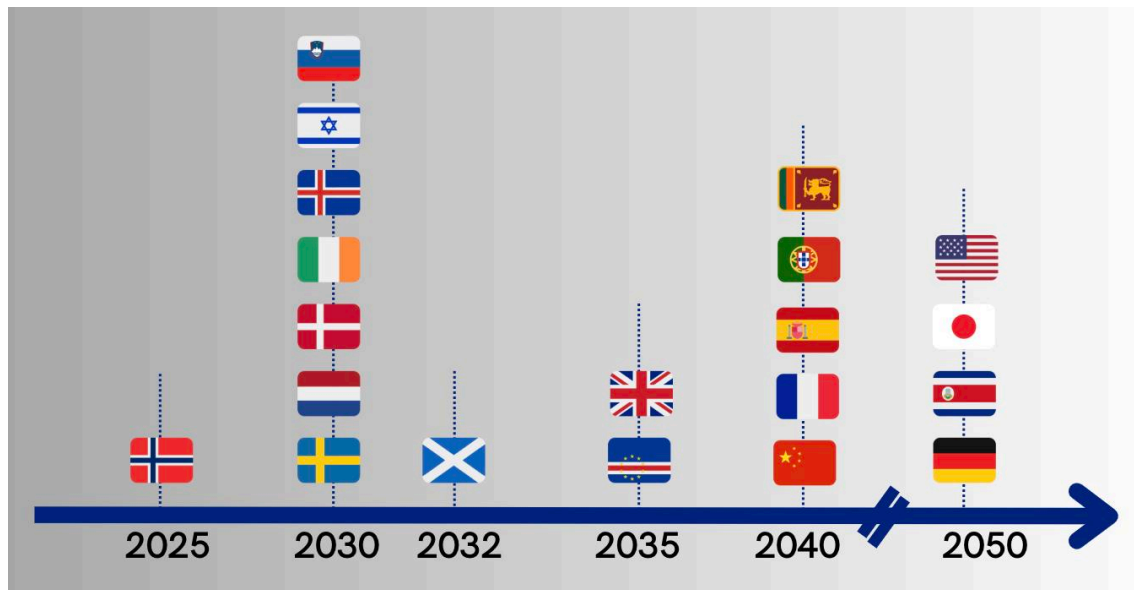


Figura 6: Línea temporal de países que eliminarán la venta de vehículos diésel y gasolina. Elaboración propia. [30]

### 3.3.1 LA DESCARBONIZACIÓN DEL TRANSPORTE EN ESPAÑA

España no se queda atrás, ya que el transporte es el sector que más emisiones produce, no solo de gases de efecto invernadero, sino también de sustancias contaminantes (acidificantes, precursores del ozono troposférico y material particulado). Estas afectan de manera más directa y negativa a la salud de todos los seres vivos del país.

En 2014 se emitieron aproximadamente 80Mt de CO<sub>2</sub> equivalente, lo que correspondió al 25% del total de las emisiones producidas en el país en ese año. Siendo el 95% de estas emisiones procedentes del transporte por carretera. [14][32]

En la Figura 7 se puede observar la evolución de las emisiones de GEI del sector transporte en general comparado con la aportación del transporte por carretera, desde 1990 a 2021. Se puede ver como las emisiones del transporte han aumentado en un 56% desde 1990 a 2021, además de cómo, a lo largo de los años, el transporte por carretera ha supuesto un gran porcentaje del total de emisiones de GEI del sector transporte.

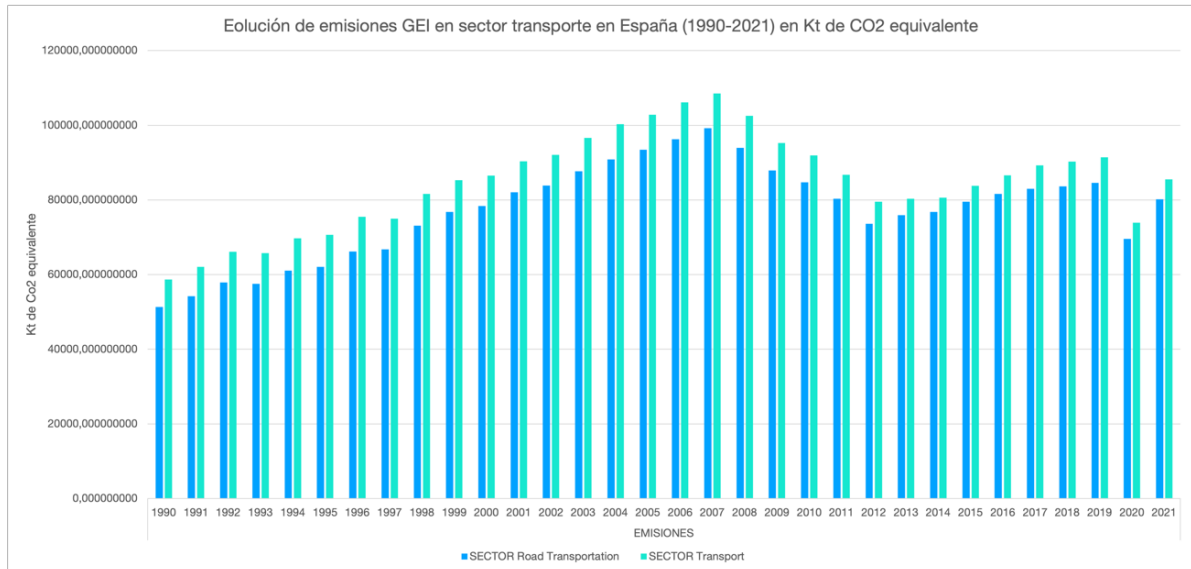


Figura 7: Evolución de emisiones GEI en el sector transporte español. Transporte vs. transporte terrestre.

Elaboración propia con datos de European Environment Agency [33]

Una manera de reducir las emisiones es que se empiece a usar más el transporte público, porque de esta manera los niveles de CO<sub>2</sub> por persona y por kilómetro reducirían [34].

El ministerio de transporte propuso en diciembre de 2022 varias medidas relacionadas con la reducción de emisiones en el sector transporte español, así como propuestas a favor de un transporte público medioambientalmente más limpio. Algunas de estas medidas reflejadas en [34] son:

- Promoción de la movilidad sostenible: Fortalecimiento de alternativas al coche privado, fomento de la movilidad peatonal, impulso de la movilidad compartida, apoyo al uso de la bicicleta como medio de transporte alternativo, etc.
- Fomento de la eficiencia energética
- Estímulo de fuentes de energía alternativas y sostenibles, propiciando su inversión junto con su reglamentación necesaria: Impulso de la infraestructura de recarga para vehículos eléctricos y de hidrógeno, penetración de las fuentes de energía alternativas en otros modos de transporte, impulso de la I+D+I para el uso de fuentes de energía alternativas, etc.

- Estímulo de medios de transporte de bajas emisiones y de medidas que inciten a la continuación y al refuerzo de las actuales políticas: contratación pública ecológica de vehículos y servicios de transporte por carretera, incentivos para la renovación del parque de vehículos de transporte por carretera, renovación de material y de flotas, etc.
- Creación del marco normativo estatal para la implementación de zonas de bajas emisiones y establecimiento de carriles BUS-VAO.
- Regulación de la velocidad y de los flujos de tráfico en las zonas urbanas y metropolitanas.

### ***3.4 COMBUSTIBLES FÓSILES – ALTERNATIVAS***

Los combustibles fósiles son, como bien indica su nombre, sustancias procedentes de organismos y otras materias descompuestas que se han ido formando a lo largo de miles de años y que, además, contienen una gran cantidad de energía, por lo que se pueden usar como combustible. Principalmente se conocen el petróleo, el gas natural y el carbón. [35]

Los beneficios más fundamentales del uso de este tipo de combustible son: su gran cantidad existente en los yacimientos, que, aunque haya peligro de extinción, todavía se mantienen; la facilidad con la que se extraen, son accesibles y además las tecnologías empleadas para ello están muy optimizadas, por lo que no suponen un coste demasiado elevado; la gran cantidad de energía que aportan en su combustión; y, la facilidad de transporte y almacenamiento. [36]

Sin embargo, el uso excesivo y continuado de estas sustancias acarrea determinadas consecuencias: los combustibles fósiles son de origen no renovable, como ya se ha mencionado con anterioridad en este trabajo, esto significa que además de ser sustancias que se encuentran en la naturaleza de forma limitada, no se podrán sustituir cuando se agoten y, su quema produce inmensas emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, la extracción y el uso de combustibles fósiles contaminan el suelo y el agua. [37]

Actualmente los combustibles fósiles están – todavía – muy presentes en el día a día. Se usan para generar electricidad, como combustible para casi todos los medios de transporte, como calefacción para los hogares y edificios, y para la producción de productos químicos como medicamentos, fertilizantes o plásticos, entre otros muchos usos posibles. [38]

La alternativa a los combustibles fósiles es la energía renovable, que es una fuente de energía procedente de recursos naturales inagotables con el tiempo, característica que representa la principal diferencia entre estos dos tipos de energía, al igual que el hecho de que las energías renovables son muy bajas o incluso nulas en emisiones de gases de efecto invernadero. [39]

Las principales energías renovables son:

- Energía solar
- Energía eólica
- Energía geotérmica
- Energía hidroeléctrica
- Energía oceánica
- Bioenergía

En el contexto del transporte terrestre, existen varias alternativas a los combustibles fósiles (gasolina y gasóleo) procedentes de fuentes renovables, cada una con sus ventajas y desventajas, pero sin duda mucho más sostenibles que la gasolina o el gasoil.

Se van a estudiar las siguientes alternativas: la electricidad, los biocombustibles y el hidrógeno.

### **3.4.1 LA ELECTRICIDAD**

El uso de electricidad como combustible es clave para la descarbonización del transporte de cara a un futuro más sostenible. Hasta el momento, es la alternativa a los combustibles fósiles preferida por la mayor parte de los fabricantes. [40]

Existen varios tipos de vehículos eléctricos, en todos se emplea un motor eléctrico cuya fuente es la electricidad. Los principales grupos son los siguientes [40]:



- Vehículos eléctricos a batería (BEV).
- Vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV).
- Vehículos eléctricos con celdas de combustión de hidrógeno (FCEV).

Los vehículos eléctricos tienen menos partes mecánicas que los vehículos de combustión convencionales. Ya sea la tecnología a la que se aplique (BEV, PHEV o FCEV), el sistema de tracción depende de: un motor eléctrico, paquetes de baterías y sistemas de frenado regenerativo. [40]

Entre algunas de las características requeridas en un motor de tracción para vehículos eléctricos en [40] se destacan:

- Funcionamiento a potencia constante a alta velocidad (es decir, par reducido).
- Durabilidad.
- Bajos requisitos de mantenimiento.
- Alta densidad de potencia.
- Alta eficiencia.
- Alto par de arranque (región de par constante).

Cuando se dice que la electricidad crea un cambio notable en el nivel de emisiones GEI en el transporte, hay que tener en cuenta que no sólo se habla del propio uso de la misma como combustible, sino también de su método de obtención mediante el empleo de energías renovables no contaminantes. Es una realidad que la movilidad terrestre eléctrica impacta enormemente el contexto medioambiental global. La energía eléctrica se puede obtener de varias maneras, aunque si el objetivo de su uso es la reducción de emisiones de GEI, la mejor opción es obtenerla de energías renovables como, por ejemplo: la solar, la eólica, o la nuclear. [40][41]

No solo por la notable reducción de emisiones de tubo de escape que presentan los vehículos eléctricos, sino también por la gran reducción de contaminación acústica que conlleva, la sociedad se ve muy beneficiada del uso de este tipo de transporte, respecto a su salud, a la mejora de su calidad de vida, y a su bienestar en general. [42]

Hay muchas opiniones que defienden que emite más cantidad de CO<sub>2</sub> el vehículo eléctrico debido a la procedencia de la energía que lo sustenta, que los vehículos tradicionales de gasolina o gasoil. Sin embargo, en España no es el caso. Los vehículos eléctricos emiten apenas 32 gramos de CO<sub>2</sub>e por kilómetro recorrido, mientras que los vehículos de combustión eficientes pueden llegar a emitir cuatro veces más, es decir, 132 gramos por kilómetro recorrido. Además, según el uso de energías renovables se vaya integrando cada vez más en la sociedad, las emisiones del vehículo eléctrico seguirán minimizándose. [41][43]

Para justificar esta afirmación se expone el siguiente ejemplo con datos actualizados del primer cuatrimestre de 2023:

Se comparan dos vehículos tipo turismo, uno de diésel, ya que, dentro de los vehículos con motores de combustión interna, el diésel es menos contaminante que la gasolina [41], y uno eléctrico:

- Consumo medio de un coche de gama media con motor diésel: de 7 a 8 litros por cada 100 km. [44]
- Consumo medio de un coche eléctrico: entre 15 y 25 kWh. [45]
- Precio medio del litro diésel: 1,49€ litro (24/04/2023). [46]
- 257€/MWh = 0,257€/kWh (febrero de 2023) [47]

Por lo tanto, con estos datos se obtiene que:

$$CoD = Consumo_d * Cld = \frac{8 \text{ l}}{100 \text{ km}} * \frac{1,49\text{€}}{\text{l}} = \frac{11,92\text{€}}{100\text{km}} = \frac{0,1192\text{€}}{\text{km}}$$

$$CoE = Consumo_e * Ce = \frac{25 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} * \frac{0,257\text{€}}{\text{kWh}} = \frac{6,425\text{€}}{100\text{km}} = \frac{0,06425\text{€}}{\text{km}}$$

Donde: *CoD* – coste de consumo de vehículo diésel; *Consumo<sub>d</sub>* – consumo medio de un vehículo diésel; *Pl<sub>d</sub>* – precio del litro de diésel; *CoE* – coste de consumo de un vehículo eléctrico; *Consumo<sub>e</sub>* – consumo medio de electricidad de un vehículo eléctrico; *Ce* – coste del kWh

Por lo que se concluye que un vehículo eléctrico podría llegar a ser alrededor de un 53,9% más barato.

### ***3.4.1.1 Tipos de vehículos eléctricos***

#### **3.4.1.1.1 Vehículos eléctricos a batería (BEV)**

Su presencia en el mercado es la mayor de los tres grupos, siendo también el modelo de vehículo eléctrico más empleado en transportes públicos urbanos. Una de las mayores ventajas es que tiene cero emisiones propias, es decir, cero emisiones en el tubo de escape. [40]

El motor de estos vehículos recibe la electricidad de las baterías y cuando regenera, les entrega la electricidad a las baterías. La recarga se puede realizar desde la red eléctrica a través de cargadores de corriente continua o a través de tomas de corriente alterna. [40]

Este tipo de VE son los más acorde con los objetivos de cero emisiones (dentro de los eléctricos), incluso ya existen modelos con hasta 400km de autonomía. [40]

#### **3.4.1.1.2 Vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV)**

Produce emisiones GEI si se usa el motor de combustión interna, ya que este tipo de vehículos disponen de ambos tipos de motores, uno eléctrico y uno de combustión. Funciona del mismo modo que el VE salvo que la autonomía del motor eléctrico es más limitada, de igual modo, ambos motores se pueden alternar según las necesidades de la conducción. [40]

Existen también los vehículos híbridos no enchufables, cuya tecnología funciona de manera similar, solo que cuando el motor eléctrico se queda sin batería, no se recarga enchufándolo a una fuente externa, si no que se recarga con la energía generada por el motor de combustión interna y la energía cinética generada durante la frenada (frenada regenerativa). [40][48]

#### **3.4.1.1.3 Vehículos eléctricos con celdas de combustión de hidrógeno (FCEV)**

Son el tipo de VE menos presente en el mercado actualmente. Al igual que el VE a batería, tiene cero emisiones de GEI en el tubo de escape. En este caso, el motor recibe la electricidad de un pack de celdas de hidrógeno. También dispone de unas baterías que proporcionan energía en caso de ser necesaria una mayor potencia. De igual manera, cuando el motor regenera, entrega energía a las baterías. El motor se recarga con hidrógeno que se almacena en tanques. [40]

Este tipo se estudiará más en profundidad más adelante, cuando se hable de hidrógeno como alternativa a los combustibles fósiles en el transporte terrestre.

#### ***3.4.1.2 Electricidad en el transporte público***

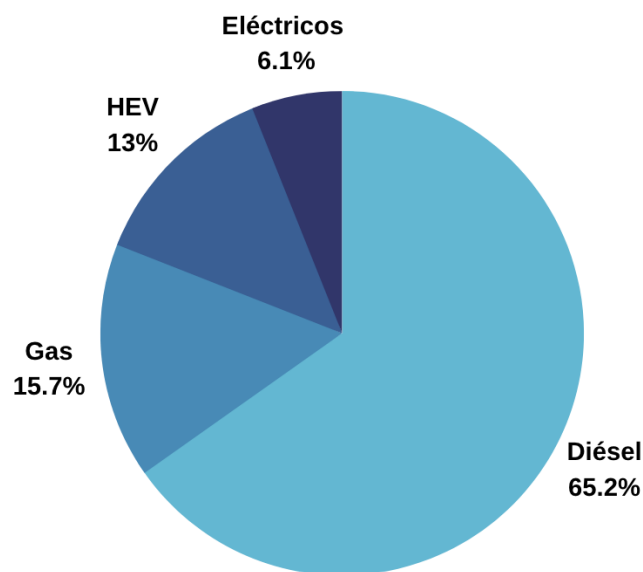
Como ya se ha mencionado antes, el transporte es el sector más contaminante del país, siendo, el coche privado el modo de transporte terrestre más común. Una de las principales acciones que reducirían considerablemente las emisiones de GEI, es el aumento del uso de transportes colectivos y/o públicos.

Hoy en día existen muchas políticas y compromisos, tanto nacionales como globales, que impulsan a los fabricantes de vehículos y operadores de flotas a fabricar opciones de emisiones reducidas, o incluso nulas, así como con una mayor eficiencia energética. [49]

En España conviven muchos tipos de transporte público terrestre eléctrico: autobús, tren, tranvía, metro y otros como, servicios de alquiler de vehículos eléctricos (automóviles y motos), taxis, bicicletas y patinetes, entre otros.

Dentro de los más comunes, que se va a entender que son el autobús, el tren, el tranvía y el metro, la mayoría de los autobuses públicos son todavía de combustión interna, y un 35% de red ferroviaria española todavía no está electrificada [50]. De estos dos, el autobús es el menos contaminante, es decir, el que menos gases de efecto invernadero produce por km y por pasajero, según [51], por viajero y por kilómetro recorrido, un autobús emite 28,4 gramos de CO<sub>2</sub>.

Los autobuses eléctricos en España están comenzando a hacerse un hueco. Poco a poco es mucho mayor la presencia de estos en las ciudades. En la Figura 8 se muestra el porcentaje de autobuses según tipo de combustible que fueron matriculados en 2022 en España. En total en ese año, el número de autobuses eléctricos ascendió a 573. [52]



*Figura 8: Matriculación de autobuses según tipo de combustible en España en 2022. Elaboración propia [52]*

En enero de 2022 la empresa de autobuses urbanos EMT Madrid anunció que iba a comprar 150 nuevos autobuses eléctricos entre ese mismo año y el siguiente [53]. En Barcelona también se ha comunicado la intención de comprar 254 nuevos autobuses eléctricos para 2024. Y como estas dos ciudades, otras muchas se están sumando al lado eléctrico en el transporte público – Valencia, Málaga, Palma de Mallorca, Zaragoza... [54]

En cuanto a la red ferroviaria española, como ya se ha mencionado, sólo está un 65% electrificada, lo que significa que por el 35% de las vías españolas circulan trenes diésel, lo que corresponde a 5617km [55]. No obstante, la red de cercanías, la cual alberga a más del 90% de usuarios del país, está más de un 75% electrificada. [50]

De todos modos, Adif ya ha anunciado los esfuerzos que están haciendo para que la red española se vaya electrificando por completo [55]. Un ejemplo es la gran incorporación de trenes de alta velocidad en la red (AVE), que actualmente representa la red más larga del país ya que en 2022 se alcanzaron los 4000km de vías [56].

### **3.4.2 BIOCOMBUSTIBLES**

Los biocombustibles son otra posible alternativa a los combustibles fósiles que podrían usarse para generar energía limpia y renovable.

Los biocombustibles pueden definirse brevemente como los líquidos o gases que producen energía al ser quemados. Se utiliza el prefijo “bio” porque este combustible se origina a partir de medios biológicos, como por ejemplo la biomasa, que se refiere a cualquier material de origen biológico, de los cuales se destaca material vegetal por la realización de la fotosíntesis. Debido a esto, la biomasa es una fuente de energía renovable y sostenible, así como biodegradable y con un balance neutro en el ciclo de carbono. En resumen, el uso de biocombustibles es una forma respetuosa con el medio ambiente de obtener energía. [57]

Los biocombustibles también suponen una gran independencia para los países que los produzcan, ya que los materiales necesarios para su elaboración (compuestos derivados de plantas y animales, alcoholes, éteres y ésteres, entre otros) se encuentran por toda la tierra, por lo que no hace falta depender de otras naciones para la obtención de biocombustibles, como pasa con el petróleo, por ejemplo. [58]

Los primeros combustibles de procedencia biológica producidos a gran escala fueron el bioetanol y el biodiésel. A partir de grasas vegetales o animales, se puede obtener fácilmente ésteres de ácidos grasos, los cuales tienen unas características muy apropiadas para utilizarse a modo de sustituto del diésel. De esta manera, y a partir del excedente de aceite vegetal, se empezó a producir el biodiésel. El problema surgió ya que no se tenía muy claro si este procedimiento era éticamente correcto, teniendo en cuenta que una parte de la humanidad vive en condiciones ya suficientemente precarias como para que encima, la demanda y el precio de bienes básicos, como los aceites vegetales, aumenten. Con el objetivo de superar

este problema, se empezaron a usar semillas secas, ricas en grasas para la producción del biodiesel, y se empezó a investigar la posibilidad de usar aceites ya usados como alimentación. [57]

En la Figura 9 se expresa un ejemplo del proceso de fabricación de biocombustible, concretamente del bioetanol.

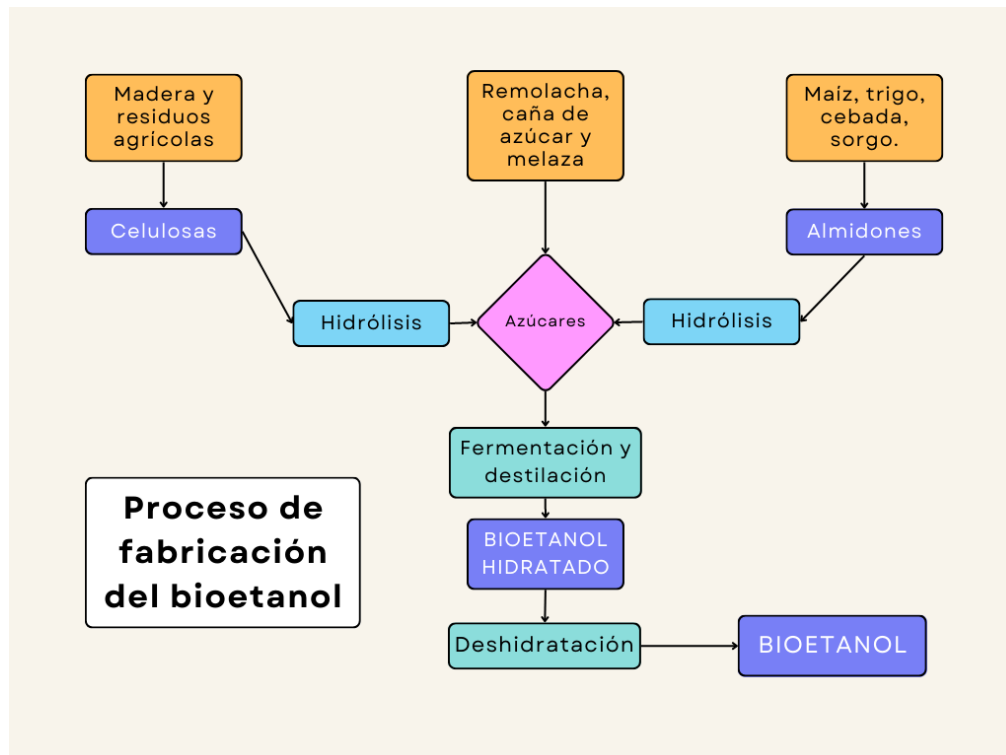


Figura 9: Proceso de fabricación del bioetanol. Elaboración propia [57].

Hoy en día, la principal fuente utilizada en la fabricación de biocombustibles, son los residuos. No obstante, análisis recientes indican la poca viabilidad económica de la producción de estas sustancias comparados con combustibles fósiles, en términos de inversión energética y costes asociados a la producción, debido a que la industria de los combustibles fósiles lleva muchos años en desarrollo y consecuentemente, está continuamente siendo optimizada [57]. Además, la producción, el almacenamiento, y el transporte de biocombustibles requiere de mucha energía debido a la gran cantidad de

elementos implicados. Se necesita sembrar y cosechar, producir pesticidas y fertilizantes, y transportar y fertilizar las plantas o granos de cereales para obtener los combustibles [59].

Referente a la reducción de emisiones, un estudio [60] indica que los biocombustibles pueden reducir los gases de efecto invernadero en un 30% aproximadamente en comparación con la gasolina.

### **3.4.2.1 Tipos de biocombustibles**

Según de donde provenga la materia empleada en la fabricación, existen diferentes tipos de biocombustibles, mostrados en la Tabla 3.

La diferencia entre los biocombustibles de primera, segunda, tercera y cuarta generación radica principalmente en las materias primas y en los procesos de producción empleados.

Tipo de biocombustible	Origen de la biomasa	Características	Ejemplos
De primera generación	Cultivos agrícolas (aceites vegetales)	Cumplen los criterios de la Directiva Europea de Energías Renovables	Biodiesel Bioetanol
De segunda generación o avanzados	Residuos de industrias agroalimentarias y forestales, aceites usados, residuos urbanos.	Impulsa la reutilización de residuos	Biogás Biometano
De tercera generación	Algas y plantas acuáticas con al menos un 50% de aceite natural	Todavía no se ha producido a nivel comercial, aunque está estudiado	
De cuarta generación	Microorganismos modificados	Tampoco se producen. Pretenden aumentar la eficiencia de almacenamiento y captación de CO <sub>2</sub>	

*Tabla 3: Tipos de biocombustibles. Elaboración propia [61]*

### **3.4.2.2 Los biocombustibles en el transporte público**

Los biocombustibles en el transporte español están regulados por el Real Decreto 1597/2011, que establece los criterios de sostenibilidad de los biocarburantes y biolíquidos [62]. Estas sustancias se usan, mezcladas con combustibles convencionales (diésel y gasolina), en el transporte por carretera desde hace muchos años; y desde el 2023, el porcentaje requerido por ley es del 10,5% [63].



Existen distintos tipos de transporte público propulsados por biocombustibles en España y en el resto del mundo. A continuación, se presentan algunos ejemplos:

#### **3.4.2.2.1 Autobuses de biogás**

En España, hay empresas como Gas Natural Fenosa y grupo Hera trabajando en varios proyectos sobre gases renovables. Concretamente, uno de los proyectos está destinado a demostrar que el biogás procedente de residuos de la vida cotidiana es un combustible válido y técnicamente viable de implementar en vehículos como los autobuses. A partir de este proyecto, se implementaron en Pamplona en 2017 un par de autobuses que se impulsan con biometano procedente de una depuradora, y actualmente, circulan por sus calles un total de 13 autobuses de biometano [64]. Otro ejemplo se puede encontrar en Bilbao, ciudad en la que se han implementado 106 autobuses impulsados por biodiésel de un total de 148 de autobuses en la flota [65]. En Francia, en varios recorridos entre ciudades, la compañía alemana Flixbus, opera autobuses interurbanos propulsados sólo por biodiésel fabricado a partir del excedente de producción de semillas de colza francesa desde finales del año 2022, vehículos que reducen sus emisiones directas de CO<sub>2</sub> en un 70% con respecto a los convencionales de diésel [66].

#### **3.4.2.2.2 Trenes de biodiésel**

Aunque todavía no se ha probado en transporte de personas, si se ha planteado un ensayo con trenes de biodiésel a partir de aceites de cocina de casa en transporte de carga que durará tres meses. Las empresas Renfe, Cepsa y Maersk han hecho ensayos con estos trenes entre Algeciras y Madrid, recorrido que en el tramo de Córdoba a Algeciras no está electrificado, por lo que una de las maneras para descarbonizarlo sería el uso de biocombustibles. [67]

### **3.4.3 HIDRÓGENO**

El uso de hidrógeno como fuente de energía posibilita el desarrollo de un gran número de nuevas tecnologías. Además, está demostrado que las pilas de hidrógeno cuentan con una elevada eficiencia energética, así como con un gran número de posibles aplicaciones en el

sector transporte. Muchos estudios realizados últimamente, dejan claro que el hidrógeno es parte del futuro, concretamente, de un futuro de emisiones contaminantes reducidas, y tecnologías energéticamente eficientes. [68]

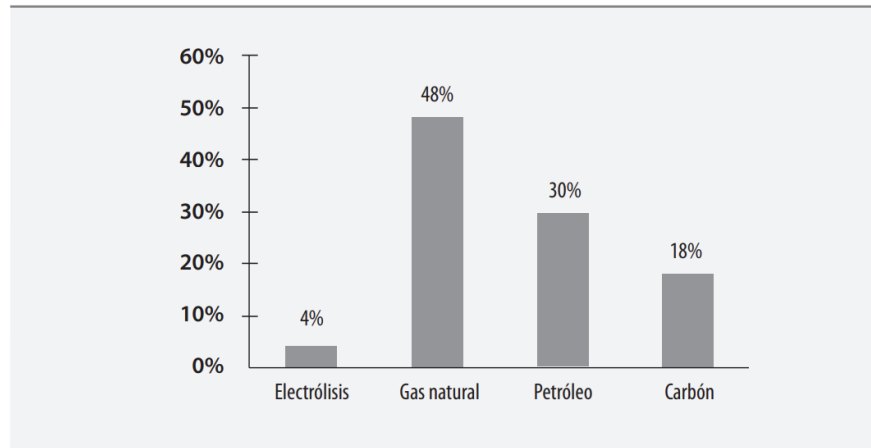
El hidrógeno es una fuente de energía limpia o casi limpia, dependiendo del proceso de obtención, aunque, si hablamos de emisiones directas, cuando se emplean pilas de combustible, las únicas emisiones son de vapor de agua. Únicamente se generarían emisiones de CO<sub>2</sub> si se emplease un proceso de combustión en la obtención de este. Si la fuente del hidrógeno son otros combustibles fósiles, como pueden ser el gas o el carbón, hay que capturar el CO<sub>2</sub> producido si se quiere conseguir un proceso libre de emisiones. [68]

Dentro de este contexto, existen varias fuentes y varias técnicas para la producción de hidrógeno: recursos fósiles convencionales (derivados del petróleo, carbón, gas natural, etc.); y recursos renovables y sostenibles (agua, biomasa). Técnicas de reacciones químicas (Gasificación, Pirólisis y Reformados); procesos de descomposición térmica (ciclos termoquímicos y termólisis directa); proceso de electrolisis; procesos biológicos (fermentación, digestión anaerobia); y procesos ópticos o fotónicos [68]. En la Tabla 4 se recogen los diferentes procesos de obtención del hidrógeno dependiendo de la fuente empleada.

Tipo de energía	Fuente	Procesos				Resultado
Renovable	Solar	Procesos fotoelectroquímicos	Termólisis	Procesos fotobiológicos	Descarbonización de combustibles fósiles	Hidrógeno
	Eólica, Hidráulica	Electrólisis				
	Geotérmica					
	Biomasa	Reformado de líquidos bioderivados	Pirólisis	Gasificación	Fermentación	
No renovable	Gas natural	Reformados		Descomposición térmica		
	Petróleo					
	Carbón	Pirólisis		Gasificación		
	uranio	Ciclos termoquímicos		Electrólisis a alta temperatura		

Tabla 4: Procesos de obtención del hidrógeno según el tipo de energía y fuente empleadas. Elaboración propia [69].

Asimismo, en la Figura 10 se puede observar de dónde proviene el hidrógeno que se emplea en la actualidad en España.



*Figura 10: Origen del hidrógeno producido en la actualidad [70].*

### **3.4.3.1 Los colores del hidrógeno**

El Hidrógeno empleado en el transporte se puede clasificar en función de la cantidad de emisiones de efecto invernadero (o CO<sub>2</sub>e) que se emite en su proceso de obtención. De hecho, para cada proceso de obtención y fuente de energía empleados hay un tipo/color distinto. Podemos distinguir los siguientes “COLORES” del hidrógeno, también esquematizados en la Figura 11.

#### **3.4.3.1.1 Hidrógeno Verde**

Se trata de un hidrógeno de emisiones cero, ya que se produce a partir de un proceso de electrólisis del agua instigado por electricidad procedente de electricidad renovable o limpia, como pueden ser la energía eólica o la energía solar. Otra manera de producirlo puede ser a partir de reformado con vapor de residuos, bioalcoholes y biogases, etc. Todavía no está lo desarrollado que debería ya que no existen incentivos ni normativa que lo favorezca. [71][72]

#### **3.4.3.1.2 Hidrógeno Rosa**

De la misma manera que el verde, este hidrógeno se obtiene a partir de un proceso de electrólisis del agua, con la diferencia de que la energía empleada para tal hecho es energía nuclear, lo que lo hace un combustible sostenible, aunque con el inconveniente de los residuos nucleares que puedan surgir. [71][73]

#### **3.4.3.1.3 Hidrógeno Turquesa**

Se obtiene a partir de un proceso de pirólisis de metal fundido, impulsado por gas natural. Las emisiones producidas son casi nulas ya que durante el proceso solo se libera hidrógeno y carbono sólido. [73]

#### **3.4.3.1.4 Hidrógeno Amarillo**

También procede de la electrólisis, pero en este caso, impulsada por fuentes mixtas, es decir, cualquier tipo de energía, tanto renovable como no renovable, por lo que sus emisiones dependerán de la fuente empleada, todos los mencionados anteriormente entran dentro de esta categoría. [73]

#### **3.4.3.1.5 Hidrógeno Blanco**

Es el hidrógeno que se encuentra de forma gaseosa en el medio ambiente. [73]

#### **3.4.3.1.6 Hidrógeno Azul**

Proviene también de fuentes fósiles, pero tiene muy bajas emisiones asociadas ya que, durante su producción, el CO<sub>2</sub> producido es capturado y recolectado y/o reutilizado. [72][73]

#### **3.4.3.1.7 Hidrógeno Gris**

Es de los más contaminantes que existen, además de ser el más empleado en la actualidad. Se puede producir de varias formas, aunque más habitualmente procede de un tratamiento térmico del gas natural o del petróleo, llamado reformado de metano con vapor. Asimismo, el proceso de obtención del metano empleado en el proceso también emite CO<sub>2</sub>. [71][73]

#### **3.4.3.1.8 Hidrógeno Marrón**

Se obtiene a través de la gasificación del carbón, por lo que se considera el hidrógeno menos sostenible de todos, debido a las grandes emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a él. [71]

### 3.4.3.1.9 Hidrógeno Dorado

Un nuevo tipo de hidrógeno que procede del biometano reformado con vapor de agua, proceso durante el cual también se capturan emisiones de CO<sub>2</sub> del ambiente, lo que lo hace un combustible cero emisiones es incluso, de emisiones negativas. [71]

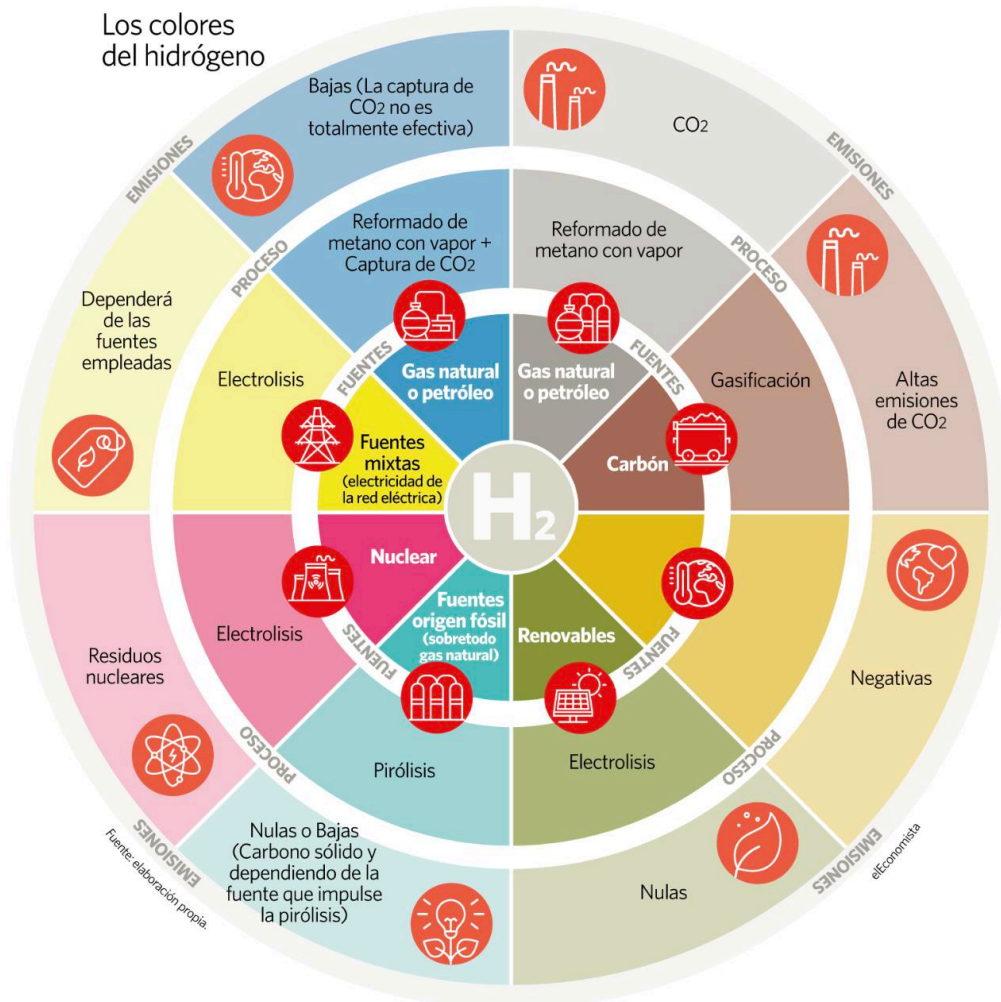


Figura 11: Los colores del hidrógeno. [71]

Se prevé que para 2050, el hidrógeno verde cubra entre el 13 y el 25 por ciento de la demanda global de energía. Los principales candidatos para el uso de hidrógeno verde son la industria, el transporte de mercancías y el almacenamiento de electricidad estacional. En un sistema completamente renovable, se espera que el hidrógeno también desempeñe un papel importante en el almacenamiento y equilibrio de la red eléctrica. [74]

### 3.4.3.2 Pilas de hidrógeno

Entre otras muchas aplicaciones del Hidrógeno, la que concierne a este proyecto es su uso como combustible de automóviles. Para ello, dichos vehículos deben poseer unas pilas de combustible.

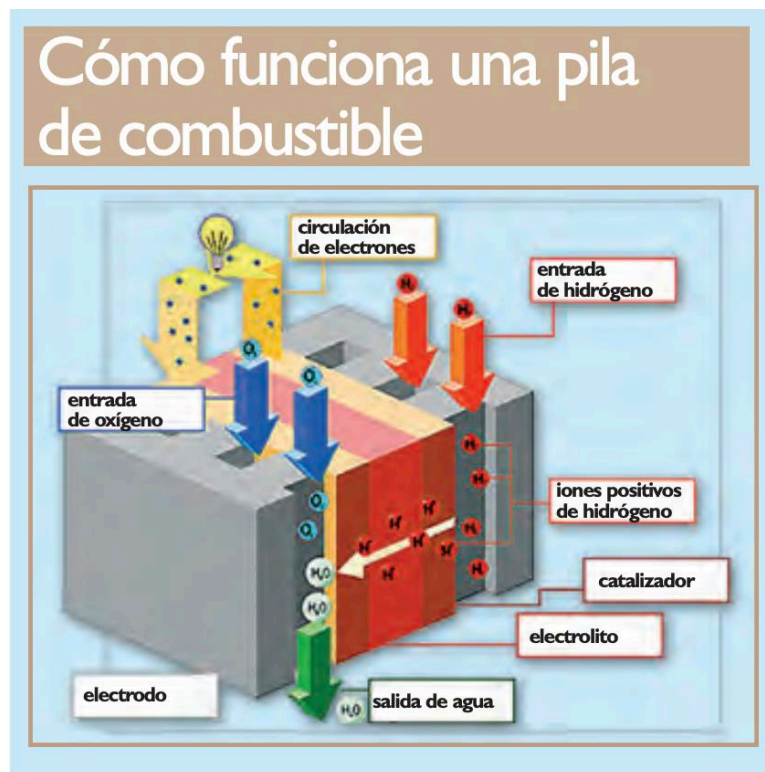


Figura 12: Cómo funciona una pila de combustible. [75]

Una pila de combustible se parece mucho a una batería, aunque mucho más avanzada tecnológicamente. La principal diferencia entre ambas es que la batería guarda la energía química, que posteriormente transforma en eléctrica, hasta que se termine, punto a partir del

cual esa batería solo puede o tirarse o recargarse, siendo este último un proceso demasiado complicado. Por otro lado, la pila de combustible, que también transforma la energía química que recibe en energía eléctrica, es capaz de mantener el suministro de esa energía transformada tanto tiempo como el combustible externo la esté alimentando. El hidrógeno (combustible que alimenta la pila de combustión) junto con el oxígeno (siempre presente en el aire) conforman los reactivos de la pila. [75]

En la Figura 12 se muestra un esquema del funcionamiento de las pilas de combustible.

### ***3.4.3.3 El hidrógeno en el transporte***

En España se han implementado varios proyectos de autobuses de hidrógeno en ciudades como Madrid, Barcelona, Bizkaia, Palma y Córdoba. Este es un transporte utilizado en todo el mundo desde hace varios años [76]. Además, se están desarrollando proyectos de producción de hidrógeno verde en lugares como Vall de L'Hidrogen de Catalunya, Valle del Hidrógeno de Aragón y Corredor del Hidrógeno del Ebro [77].

En la ciudad de Torrejón de Ardoz, en Madrid, se puso en funcionamiento un autobús de hidrógeno a principios de 2022, el cual evita un total de 132 gramos de CO<sub>2</sub> a la atmósfera cada 100km en comparación con los autobuses diésel que recorren la misma ruta. También en Barcelona cuentan con este tipo de vehículos urbanos desde abril de 2022. [76]

Cabe destacar que el hidrógeno dispone de la densidad de energía necesaria como para descarbonizar los trenes que todavía son de diésel, lo cual además de eliminar las emisiones, reduciría considerablemente la contaminación acústica. Hay varios proyectos ya en marcha en Alemania sobre el hidrógeno como alternativa en el transporte ferroviario, y se han anunciado otros proyectos también en Austria y Francia. [78]

A nivel mundial, hay autobuses de pasajeros y camiones de carga funcionando con hidrógeno en países como Corea, Alemania y Suiza. Los autobuses de hidrógeno actualmente pueden recorrer distancias 150 % mayores que los vehículos eléctricos (500 km frente a 200 km). El transporte público y las flotas cautivas de vehículos representan un mercado prometedor para el hidrógeno. [79][80]



## **Capítulo 4. CASO PRÁCTICO – ANÁLISIS DE ESCENARIOS**

### ***4.1 INTRODUCCIÓN***

Es un hecho que el transporte público en España no está tan avanzado como debería si se quieren alcanzar los objetivos de la Agenda 2030. Como ya se ha visto con anterioridad, los transportes públicos terrestres más comunes son el autobús, el metro y el tren, de los cuales el autobús es el menos desarrollado respecto a la disminución de emisiones contaminantes. Es por ello por lo que se ha elegido analizar un posible caso futuro relacionado con los autobuses urbanos de la ciudad de Madrid y su método de descarbonización.

Este es un breve y simplificado estudio que ayudará a hacer una idea de lo que podría ser, en cuanto a reducción de CO<sub>2</sub> equivalente en la atmósfera y en cuanto a posibilidad económica de la empresa de transportes, que en este caso es EMT Madrid, la encargada de todos los autobuses urbanos de la ciudad.

Para ofrecer un poco de contexto: esta empresa de transportes, en funcionamiento desde 1971, es responsable de varias actividades relacionadas con el transporte en la ciudad. No solo dispone de autobuses urbanos y se encarga de sus rutas, sino que también es responsable de proporcionar el servicio de retirada de vehículos de la vía pública cuando es necesario; gestiona varios aparcamientos públicos de la ciudad; gestiona el servicio público de bicicletas (BiciMad), así como el Teleférico de Madrid; y, además, participa en proyectos de movilidad urbana y ejerce explotación publicitaria al exhibir en sus vehículos y aparcamientos distintas campañas publicitarias externas; entre otras funciones. [81]

Después de la pandemia de la COVID-19, la empresa municipal de transportes (EMT) experimentó una buena recuperación. En 2021 obtuvo un beneficio de 8,4 millones de euros y alrededor de 300 millones de viajeros [82]. Posteriormente, en 2022, aumentó el número



de personas transportadas hasta alrededor de 373 millones de viajeros, un claro ejemplo de su recuperación. [83]

Durante la pandemia, la empresa fue adaptando los servicios que ofrecía conforme la demanda de estos iba disminuyendo, no sin dejar de garantizar la prestación de sus servicios en ningún momento. Además, se implementaron nuevas medidas acorde con las necesidades sanitarias del momento, como quitar del servicio a aquellos trabajadores o trabajadoras mayores de 60 años y reforzar los servicios de limpieza y desinfección de los vehículos. [82]

Asimismo, para fomentar la movilidad sostenible y reforzar el uso del transporte público en la ciudad, la empresa ha ofrecido viajes gratuitos en días concretos, como, por ejemplo, en septiembre de 2021, fecha en la cual se obtuvo el récord de usuarios después de la pandemia. [84]

## **4.2 CÁLCULOS**

Con el objetivo de analizar posibles alternativas a los combustibles fósiles, se han analizado 3 escenarios – o casos – situados en la ciudad de Madrid. El análisis se ha realizado desde un punto de vista de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>e y desde un punto de vista económico, para así conocer la alternativa óptima.

Las emisiones del tubo de escape que no son de CO<sub>2</sub> (CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O) se incluyen como cantidades equivalentes de CO<sub>2</sub>, ya que su efecto por kilómetro es menor, añadiendo entre 39 gramos y 65 gramos de CO<sub>2</sub>e/km [85].

- Caso Base: año 2021. Es el caso inicial con datos originales de la EMT Madrid, la empresa encargada de los autobuses urbanos públicos de la ciudad, a partir del cual se harán las comparaciones.
- Caso 1: año 2030. Situación en la que los autobuses públicos urbanos de Madrid son todos 100% eléctricos. Se divide en dos posibles alternativas.
  - Caso 1.A: Futuro optimista, en el que la procedencia de la energía eléctrica renovable ocupa un 74% del total. [86]

- Caso 1.B: Futuro más realista, en el que la procedencia de la energía eléctrica renovable ocupa un 68% del total. [87]
- Caso 2: año 2030. Situación en la que los autobuses públicos urbanos de Madrid son todos de Hidrógeno.
  - Caso 2.A: El hidrógeno empleado es de “color” azul.
  - Caso 2.B: el hidrógeno empleado es de “color” verde.

Para determinar cuántas emisiones de CO<sub>2e</sub> se asocian a la actividad de los autobuses, se tienen en cuenta tanto las emisiones directas (de tubo de escape) como las indirectas.

- Emisiones directas de gases: en este caso, son aquellas que provienen de fuentes controladas por la empresa de transportes. Son las emisiones que corresponden a la principal actividad de los autobuses: el transporte de personas. Debido a esto, se contabilizan en este grupo las emisiones de tubo de escape de los autobuses. [88]
- Emisiones indirectas de gases: son aquellas que provienen a consecuencia de actividades relacionadas con la actividad principal, que no están controladas por la empresa de transportes, al menos no de primera mano [88]. En este estudio se tendrán en cuenta como emisiones indirectas las asociadas a:
  - Procedencia del combustible de los autobuses.
  - Fabricación, mantenimiento y reciclaje de los autobuses.

## **4.2.1 ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES**

### **4.2.1.1 Caso Base**

El caso base, como ya se ha explicado antes, se trata de la situación presente con respecto a los autobuses urbanos públicos de Madrid en el año 2021.

En la Tabla 5 se encuentran los datos obtenidos de la empresa EMT Madrid [81] acerca del número de autobuses de cada tipo correspondientes a este momento, usados en este caso. Las siglas GNC corresponden a Gas Natural Comprimido.

<b>Autobuses</b>	<b>Cantidad</b>
GNC convencional	1.642
GNC Híbrido (regenerativo)	7
GNC Híbrido enchufable	7
GNC Híbrido diésel	1
Diésel (mayor y menor que euro-V)	278
Diésel híbrido (eléctrico)	30
Eléctrico 100%	130
<b>TOTAL</b>	<b>2.095</b>

*Tabla 5: Cantidad de autobuses de MadridEMT según combustible (2021). Elaboración propia [81].*

Para posteriormente poder determinar las emisiones asociadas a la procedencia de la electricidad que se emplea como combustible, se han hecho las especificaciones mostradas en la Tabla 6. Con respecto a los vehículos híbridos. Se ha supuesto que los kWh consumidos y los Km recorridos por los híbridos en total son directamente proporcionales a la cantidad de cada uno de ellos.

A partir de estos datos se ha calculado la cantidad de energía consumida por cada autobús híbrido diésel eléctrico, suponiendo que todos los de este tipo consumen lo mismo. Según un artículo de ABC Motor [89], los vehículos híbridos pueden consumir hasta un 30% menos de diésel que un vehículo convencional, debido a esto, se han hecho los cálculos a partir de esta afirmación. Como se conoce cuantos kWh se consume en 2021 por parte de los vehículos híbridos, y como se muestra en la Tabla 6, se ha obtenido la cantidad de kWh

consumidos por cada tipo de híbrido se han realizado los siguientes cálculos, recogidos en la Tabla 7.

$$C_{dh} = C_d * 0,7$$

$$C_{Th} = C_{dh} + C_{eh}$$

Donde:  $C_{dh}$  – consumo de diésel de un autobús híbrido (diésel-eléctrico);  $C_d$  – consumo de diésel un autobús convencional;  $C_{Th}$  – consumo total en kWh de un autobús híbrido (diésel-eléctrico);  $C_{eh}$  – consumo de electricidad de un autobús híbrido (diésel-electricidad).

	Cantidad	KWh consumidos	Km recorridos	%
<b>Híbridos</b>	45	9.575.229,00	2.041.104,41	100,00
· GNC - electricidad	14	2.978.960,13	635.010,26	31,11
· Diésel - electricidad	30	6.383.486,00	1.360.736,27	66,67
· GNC - diésel	1	212.782,87	45.357,88	2,22

Tabla 6: Datos de referencia del Caso Base. Elaboración propia [81].

<b>Consumo de un autobús Diésel</b>	278.915,18	kWh/autobús
<b>Consumo Diésel de un autobús Híbrido (30% menos)</b>	195.240,63	kWh/autobús
<b>Consumo TOTAL de un Híbrido Diésel-Eléctrico (2021)</b>	212.782,87	kWh/autobús
· de los cuales son de electricidad	17.542,24	kWh/autobús
· de los cuales son de diésel	195.240,63	kWh/autobús

Tabla 7: Cálculos de consumos de los híbridos en el Caso Base

Con respecto a los otros tipos de vehículos híbridos (GNC-electricidad y GNC-diésel) se ha supuesto que la mayor parte de la energía consumida corresponde al Gas Natural, ya que no se han encontrado referencias acerca del porcentaje de consumo de cada combustible en este tipo de autobuses.

A modo resumen se recogen todos los datos necesarios para seguir con los cálculos de emisiones indirectas de CO<sub>2</sub>e en el caso base en la Tabla 8.

Autobuses y energía	Cantidad	Consumo (kWh/100km)	Consumo kWh total	km recorridos
<b>Eléctricos/electricidad</b>	130	128,71	3.596.659,00	2.794.389,71
<b>Híbridos (todos los combustibles)</b>	45	469,12	9.575.229,00	2.041.104,41
· <b>Electricidad (*)</b>	-	-	526.267,15	-
· <b>Diésel (**)</b>	-	-	5.857.218,85	-
· <b>Gas Natural (***)</b>	-	-	3.191.743,00	-
<b>GNC/Gas Natural</b>	1.642	663,22	541.012.158,00	81.573.559,00
<b>Diésel</b>	278	508,57	77.538.421,00	15.246.361,56
<b>TOTAL</b>	2.095	1.300,50	622.147.238,00	101.655.414,68

*Tabla 8: Consumos específicos de cada combustible del Caso Base*

\* *Electricidad correspondiente a los híbridos diésel-electricidad.*

\*\* *Diésel correspondiente a los híbridos diésel-electricidad.*

\*\*\* *Gas Natural correspondiente a todos los tipos de híbrido de Gas natural-otro.*

Además, se conoce que la cantidad de CO<sub>2e</sub> emitida durante el año 2021 de manera directa por la flota de autobuses asciende a un total de 132.042,60 toneladas de CO<sub>2e</sub>.

#### **4.2.1.1.1 Cálculo de emisiones asociadas a la procedencia del combustible**

Para determinar las emisiones indirectas derivadas de los combustibles se han hecho las siguientes suposiciones:

- La energía eléctrica consumida por los autobuses proviene de fuentes renovables y no renovables en la misma proporción en la que se genera cada una en España. Es decir, en 2021 en el país se generaron 246.805,00 GWh de energía eléctrica de los cuales el 48,40 % se produjeron a partir de fuentes renovables (un total de 119.453,62 GWh) y, el 51,60% restantes (un total de 127.351,38 GWh), a partir de fuentes no renovables. [28]
- La cantidad de CO<sub>2e</sub> emitida debido a la producción de energía eléctrica se debe únicamente a la producción de energía eléctrica a raíz de fuentes no renovables.
- Para simplificar los cálculos, se supone que la demanda y la generación de electricidad en España es la misma.

Se sabe que se generaron 35.900.000,00 toneladas de CO<sub>2e</sub> en 2021 debido a la producción de energía eléctrica [28]. A partir de este dato, se ha calculado un factor de emisión de toneladas de CO<sub>2e</sub> por kWh de energía eléctrica producido/consumido:

$$fe = \frac{et}{p} = \frac{35.9000,00 \text{ TmCO}_2}{246.805,00 \text{ GWh}} = 145,46 \frac{\text{TmCO}_2}{\text{GWh}}$$

$$fe = 145,46 \frac{\text{TmCO}_2}{\text{GWh}} = 0,00014546 \frac{\text{TmCO}_2}{\text{kWh}}$$

Donde: *fe* – es el factor de emisión; *et* – la cantidad de CO<sub>2e</sub> emitida debido a la producción de energía eléctrica; *p* – es la producción total de energía eléctrica.

Por lo tanto, multiplicando este factor por la energía no renovable consumida por los autobuses en concepto de combustible, se obtiene la cantidad de dióxido de carbono emitido

a la atmósfera por el uso de esta energía, ya que las emisiones asociadas a la producción de energía renovable se consideran nulas.

$$Etc = 546.869.376,85 \text{ kWh}$$

$$Etr = Etc * \frac{48,4}{100} = 264.684.778,40 \text{ kWh}$$

$$Etnr = Etc * \frac{51,6}{100} = 282.184.598,48 \text{ kWh}$$

$$enr = Etnr * fe = 41.046,28 \text{ TmCO}_2$$

$$er = 0 \text{ TmCO}_2$$

$$TeE = enr + er = 41.046,28 \text{ TmCO}_2$$

Donde: *Etc* – electricidad consumida por los autobuses en total; *Etr* – energía eléctrica procedente de fuentes renovables consumida; *Etnr* – energía procedente de fuentes no renovables consumida; *enr* – cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>e asociadas al consumo de energía eléctrica no renovable; *er* – cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>e asociadas al consumo de energía eléctrica renovable; *TeE* – emisiones totales asociadas al uso de energía eléctrica como combustible.

Con respecto a las emisiones asociadas al consumo de diésel y Gas natural se presentan en la Tabla 9 y en la Tabla 10 los cálculos pertinentes. Las consideraciones a la hora de obtener estos datos que se han tenido en cuenta en [90] son las siguientes:

- Para el gas natural, se han contabilizado las emisiones por la extracción, transporte terrestre en país de origen por gasoducto, transporte marítimo en metanero, regasificación, transporte terrestre en gasoducto en país de destino (España), proceso de almacenamiento y proceso de compresión en la estación de servicio. Además, se han incluido las emisiones fugitivas que se generan durante estos procesos.

- Para el gasóleo, se han contabilizado las emisiones por su extracción, transporte terrestre en país de origen por oleoductos, refino y transporte terrestre por oleoductos y camiones en España (país de destino). Además, también se han incluido las emisiones fugitivas procedentes de los mencionados procesos.

Para información más detallada ver [90].

<b>Emisiones de ciclo de vida – Gas Natural</b>	11.065,03	Kg CO <sub>2</sub> e/TJ	Fuente:
	0,04	Kg CO <sub>2</sub> e/KWh	[90]
<b>Consumo Gas Natural</b>	544.203.901,00	KWh	
<b>Emisiones totales consumo Gas Natural</b>	21.677,88	Toneladas de CO <sub>2</sub> e	

Tabla 9: Emisiones de autocares de GNC en 2021.

<b>Emisiones de ciclo de vida – Diésel</b>	21.633,99	Kg CO <sub>2</sub> e/TJ	Fuente:
	0,08	Kg CO <sub>2</sub> e/KWh	[90]
<b>Consumo Diésel</b>	83.395.639,85	KWh	
<b>Emisiones totales consumo diésel</b>	6.495,05	Toneladas de CO <sub>2</sub> e	

Tabla 10: Emisiones de autocares de diésel en 2021.

#### 4.2.1.1.2 Cálculo de las emisiones asociadas a la fabricación, mantenimiento y reciclaje de los autobuses

Según un estudio de Febrero de 2023 del ICCT (The International Council on Clean transportation) [85], en el que se compara las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida de varios vehículos pesados propulsados por diferentes combustibles, para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub>e indirectas debidas a la fabricación y mantenimiento de



autobuses en el año 2021, se pueden tomar como referencia las características y factores de emisión de cada componente según tipo de vehículo especificadas en la Tabla 11, la Tabla 12, la Tabla 13, y la Tabla 14.

En este estudio [85] se cuentan las emisiones de gases de efecto invernadero de los vehículos derivadas de: la producción de los autobuses, su mantenimiento, y su reciclaje. También se tienen en cuenta las emisiones derivadas del uso y fabricación del combustible, pero, no incumbe a este apartado del proyecto. Cabe destacar, que tampoco se tiene en cuenta las emisiones procedentes de la fabricación y mantenimiento de las diferentes infraestructuras necesarias para la producción y reciclaje de los vehículos, ni las necesarias para su repostaje, recarga, almacenamiento o distribución de los combustibles, ya que se entiende que son emisiones muy similares en todas las cadenas de producción, independientemente del tipo de vehículo y/o combustible, y que además suponen una influencia muy pequeña en el total de emisiones GEI del ciclo de vida. El peso del vehículo en vacío se refiere a la masa del vehículo sin el sistema de propulsión; la capacidad de la batería se refiere a la energía necesaria para recorrer la misma distancia (por ello en 2030 es menor); y la capacidad del tanque de H<sub>2</sub> se refiere a la cantidad de Hidrógeno necesaria para recorrer la misma distancia, mismo caso que con la batería (por ello en 2030 es menor).

Características vehículos	2021
Peso vehículo en vacío	11.600,00 kg
Capacidad batería	300,00 kWh
Capacidad tanque H2	37,00 Kg

*Tabla 11: Características de los autobuses de 2021.*

Características vehículos	2030 (a y b)
Peso vehículo en vacío	11.600,00 kg
Capacidad batería	250,00 kWh
Capacidad tanque H2	30,00 Kg

*Tabla 12: Características de los autobuses de 2030.*

Con respecto a los factores de emisión, tanto de 2021 (tabla x8.1) como de 2030 (Tabla x8.2.), en [85] se tienen en cuenta las siguientes especificaciones:

- En el cálculo de las emisiones derivadas de la fabricación del chasis y del sistema de propulsión, para vehículos diésel y para vehículos eléctricos (y de hidrógeno), se incluyen: las emisiones por la producción del vehículo, incluyendo la extracción y el procesamiento de la materia prima; la construcción y el montaje de los distintos componentes; y, el reciclaje de las partes del vehículo.
- En el cálculo de las emisiones derivadas de las baterías eléctricas, en el caso de los vehículos eléctricos, se tienen en cuenta: las emisiones procedentes de la fabricación de los bloques de baterías, incluyendo la extracción y el procesamiento de la materia prima necesaria; el montaje de los componentes del vehículo; y, las emisiones derivadas de un recambio de batería en todo su ciclo de vida.
- En el cálculo de las emisiones derivadas de las celdas de combustible y los tanques de almacenamiento de Hidrógeno, se tienen en cuenta las emisiones asociadas a la producción del tanque y las derivadas de la extracción y el procesamiento de la materia prima empleada en el proceso.
- A mayores, se incluyen todas las emisiones procedentes del mantenimiento de los autocares, en las que también se tienen en cuenta las sustituciones de consumibles como neumáticos, aceites, urea, etc.

Asimismo, se supone que para el año 2030, el consumo de energía y/o combustible se reducirá en un 25% con respecto a 2021, de ahí que los factores de emisión sean menores.

<b>Fabricación + mantenimiento + reciclaje</b>	<b>Factor de emisión (2021)</b>
Chasis + sistema de propulsión	
· Diésel y eléctrico	6,60 toneladas de CO2e/tonelada
· Gas Natural	7,00 toneladas de CO2e/tonelada
Batería eléctrica	58,00 kg de CO2e / kWh
Celda de combustible + tanque de H2 de 5kg de capacidad	4,20 toneladas de CO2e

*Tabla 13: Factores de emisión por fabricación, mantenimiento y reciclaje en 2021.*

<b>Fabricación + mantenimiento + reciclaje</b>	<b>factor de emisión (2030)</b>
Chasis + sistema de propulsión	
· Diésel y eléctrico	5,60 toneladas de CO2e/toneladas
· Gas Natural	5,94 toneladas de CO2e/toneladas
Batería eléctrica	37,00 kg de CO2e / kWh
Celda de combustible + tanque de H2 de 5kg de capacidad	3,40 toneladas de CO2e

*Tabla 14: Factores de emisión por fabricación, mantenimiento y reciclaje en 2030.*

Para más información sobre la procedencia de los parámetros, ver [85].

Como se muestra en la Tabla 6, se conoce la cantidad de autobuses de cada tipo que estaban en funcionamiento en 2021. Si se multiplica el factor de emisión por los parámetros correspondientes, se obtiene la cantidad de emisiones asociadas a cada autobús de cada tipo (individual), cantidad que multiplicada por el número de autobuses de cada tipo proporciona las toneladas de CO<sub>2</sub>e emitidas.

Para los autobuses diésel únicamente se contabilizará la fabricación del chasis y del sistema de propulsión.

$$Ead = Fde * P * Nd$$

$$Ead = 6,60 \frac{TmCO2}{Tm} * 11.600,00 \frac{Tm}{autobús} * 278 \text{ autobús} = 21.283,68 TmCO2$$

Donde: *Ead* – emisiones CO<sub>2</sub>e de autobuses de diésel; *Fde* – factor de emisión de chasis + sistema de propulsión autobuses diésel y eléctricos/híbridos; *P* – masa de un autobús en vacío; *Nd* – número de autobuses diésel

Para los autobuses eléctricos/híbridos, además del chasis y el sistema de propulsión, se contabilizarán las emisiones asociadas a la fabricación, mantenimiento y reposición de las baterías eléctricas.

$$Eae = (Fde * P + Fb * Cb) * Ne$$

$$Eae = \left( 6,60 \frac{TmCO2}{Tm} * 11.600,00 \frac{Tm}{autobús} + 0,058 \frac{TmCO2}{kWh} * 300 kWh \right) * 130 \text{ autobús} = 16.349,04 TmCO2$$

Donde: *Eae* – emisiones CO<sub>2</sub>e de autobuses eléctricos/híbridos; *Fde* – factor de emisión de chasis + sistema de propulsión autobuses diésel y eléctricos/híbridos; *P* – masa de un autobús en vacío; *Fb* – Factor de emisión de fabricación de una batería eléctrica; *Cb* –

capacidad media de una batería eléctrica para un autobús;  $N_e$  – número de autobuses eléctricos/híbridos

Y, finalmente, para los autobuses de Gas Natural Comprimido, el mismo procedimiento que con los de diésel. Sólo se tienen en cuenta las emisiones de la fabricación y el mantenimiento del chasis y del sistema de propulsión.

$$E_{ag} = F_{dg} * P * N_g$$

$$E_{ag} = 7 \frac{TmCO_2}{Tm} * 11.600 \frac{Tm}{autobús} * 1.643 \text{ autobús} = 133.335,36 TmCO_2$$

Donde:  $E_{ag}$  – emisiones  $CO_2e$  de autobuses de Gas Natural Comprimido;  $F_{dg}$  – factor de emisión autobuses de chasis + sistema de propulsión de Gas Natural Comprimido;  $P$  – masa de un autobús en vacío;  $N_g$  – número de autobuses de gas natural

Sumando los resultados de los cálculos anteriores se concluye que la cantidad de emisiones de dióxido de carbono asociadas a la fabricación y mantenimiento de los autobuses de 2021 es igual a 170.968,08 toneladas de  $CO_2e$  equivalente.

#### **4.2.1.2 Caso 1**

Para este caso, situado en el año 2030 se han obtenido algunos datos a partir de un pronóstico lineal con datos ofrecidos por la propia empresa de transportes de 2013 hasta 2021. Estos datos han resultado:

- El número de autobuses en funcionamiento = 2369 autobuses
- Los km recorridos en todo el año = 142.244.388,84 km

A partir de los km estimados y del dato del consumo de electricidad por cada 100km de 2021 se ha calculado el consumo total de kWh que podría darse en 2030:

$$Consumo_{2030} = \frac{Consumo_{2021}}{100km} * km_{2030}$$

$$\text{Consumo}_{2030} = \frac{128,71 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} * 142.244.288,84 \text{ km} = 183.082.752,87 \text{ kWh}$$

Los datos básicos para el análisis de este escenario se muestran en la Tabla 15.

Autobuses	Cantidad	Consumo (kWh/100km)	Consumo total (kWh)	km recorridos
Eléctricos	2.369	128,71	183.082.752,87	142.244.388,84

*Tabla 15: Datos de referencia del caso 1.*

#### 4.2.1.2.1 Cálculo de las emisiones asociadas a la procedencia del combustible.

En este caso, el único combustible existente es la energía eléctrica. Para hacer el cálculo de emisiones asociadas al consumo de la misma, se sigue el mismo procedimiento que en el caso base: se supone que la proporción de energía eléctrica renovable y no renovable producida en España es la misma que la proporción de energía eléctrica renovable y no renovable consumida por la empresa con el fin de que los vehículos funcionen.

Este caso se divide en dos posibles escenarios:

- Escenario a) Una situación optimista. Según el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 del Ministerio de Transición Ecológica de España [86], el objetivo para el año 2030 es alcanzar al menos un 74% de procedencia de fuentes renovables de la generación de energía. Por lo que el 36% restante será de origen no renovable.
- Escenario b) Una situación más realista. Aunque el objetivo sea el mencionado anteriormente, hay expertos que creen que España no está haciendo lo necesario para que se cumpla dicho objetivo. Según un artículo de Business Insider España [87], en 2030 el porcentaje de energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables será del 68%, en el mejor de los casos.

En ambos casos se conoce la proyección de demanda de energía eléctrica de 2030, que asciende a un valor entre 420 y 470 TWh [91]. En la Tabla 16 se muestra el balance

energético previsto para estos dos escenarios a partir de la estimación de consumo total para este año.

Consumo	2030a		2030b	
Electricidad	183.082.752,87	kWh	183.082.752,87	kWh
· de fuentes renovables	135.481.237,12	kWh	124.496.271,95	kWh
· de fuentes NO renovables	47.601.515,75	kWh	58.586.480,92	kWh

Tabla 16: Consumo de electricidad según fuente y situación.

Como es imposible conocer la cantidad de emisiones de dióxido de carbono que se darán en las 2030 asociadas a la producción de energía eléctrica, para el cálculo de emisiones por consumo de esta energía se va a emplear el mismo factor de emisión que se calculó en el caso base a partir de los datos de emisiones reales producidas en 2021 por la generación y el total de GWh generados ( $f_e$ ).

$$f_e = 145,46 \frac{TmCO_2}{GWh} = 0,00014546 \frac{TmCO_2}{kWh}$$

Finalmente, multiplicando este factor por el total de energía eléctrica procedente de fuentes no renovables consumida, se obtiene la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>e asociadas al combustible de cada escenario.

$$CO_2a = Ca * f_e = 47.601.515,75 \text{ kWh} * 0,00014546 \frac{TmCO_2}{kWh} = 6.924,07 TmCO_2$$

$$CO_2b = Cb * f_e = 58.586.480,92 \text{ kWh} * 0,00014546 \frac{TmCO_2}{kWh} = 8.521,93 TmCO_2$$

Donde:  $CO2a$  – emisiones de  $CO2e$  del escenario a asociadas al consumo de electricidad;  
 $CO2b$  – emisiones de  $CO2e$  del escenario b asociadas al consumo de electricidad;  $fe$  – factor de emisión

Con respecto al consumo de diésel, gas natural o hidrógeno no se produciría ninguna emisión de gases ya que no existe otro tipo de autobuses que no sea propulsado con electricidad únicamente en este supuesto.

#### 4.2.1.2.2 Cálculo de las emisiones asociadas a la fabricación, mantenimiento y reciclaje de los autobuses

Se emplea el mismo estudio [85] que se usa para los cálculos del caso base, con las características referentes a vehículos eléctricos en el año 2030, mostradas en la Tabla 12 y en la Tabla 14.

Como se muestra en la Tabla 15, se conoce la cantidad de autobuses de cada tipo que estaban en funcionamiento en 2030. Si se multiplica el factor de emisión por los parámetros correspondientes, se obtiene la cantidad de emisiones asociadas a cada autobús eléctrico, cantidad que multiplicada por el número de autobuses proporciona las toneladas de  $CO2e$  emitidas.

En este escenario solamente existen autobuses eléctricos, para los que además del chasis y el sistema de propulsión, se contabilizarán las emisiones asociadas a la fabricación, mantenimiento y reposición de las baterías eléctricas.

$$Eae = (Fde * P + Fb * Cb) * Ne$$

$$Eae = \left( 5,60 \frac{TmCO2}{Tm} * 11.600,00 \frac{Tm}{autobús} + 0,037 \frac{TmCO2}{kWh} * 250 kWh \right) * 2.369 autobús = 175.803,49 TmCO2e$$

Donde:  $Eae$  – emisiones  $CO2e$  de autobuses eléctricos;  $Fde$  – factor de emisión de chasis + sistema de propulsión autobuses diésel y eléctricos;  $P$  – masa de un autobús en vacío;  $Fb$  –



*Factor de emisión de fabricación de una batería eléctrica;  $C_b$  – capacidad media de una batería eléctrica para un autobús;  $N_e$  – número de autobuses eléctricos.*

Se concluye que la cantidad de emisiones de dióxido de carbono equivalente asociadas a la fabricación y mantenimiento de los autobuses de 2030 es igual a 175.803,49 toneladas de CO<sub>2</sub>e.

#### **4.2.1.3 Caso 2**

Para este caso se emplean los mismos datos de cantidad de autobuses en funcionamiento y de km recorridos estimados para el caso 1, ya que este se sitúa en el mismo año (2030) con la diferencia de que ahora la flota de autobuses está completamente formada por autobuses eléctricos de celdas de combustible de hidrógeno.

Para el análisis se compararán las emisiones producidas si el combustible empleado es Hidrógeno verde o Hidrógeno azul:

- Hidrógeno verde: es renovable porque se produce a partir de fuentes de energía renovables por lo que es nulo en emisiones de CO<sub>2</sub>. [72]
- Hidrógeno azul: integra sistemas de captura de CO<sub>2</sub> emitido porque se produce a partir de fuentes fósiles, aunque de esta manera se consigue que sea bajo en emisiones. [72]

Los autobuses propulsados por hidrógeno que se introdujeron en la ciudad de Barcelona en 2020, se esperaba que consumieran unos 9kg de H<sub>2</sub> por cada 100km de recorrido. Sin embargo, finalmente estos sólo consumieron una media anual de 7,51kgH<sub>2</sub>/100km [92]. También hay otras fuentes [93] que indican que el consumo varía considerablemente en función de la temperatura a la que se someta el vehículo (Figura 13) y en función al momento del año en el que se mida (Figura 14). Debido a esto, para el análisis se va a tomar como dato 6kgH<sub>2</sub>/100km de consumo medio anual ya que, se espera que para el año 2030 las tecnologías estén un poco más avanzadas que en la actualidad y porque, además, los autobuses urbanos madrileños suelen tener una velocidad media reducida, lo que hará que

consuman menos combustible que aquellos que recorren grandes recorridos a mayores velocidades.

### Fuel consumption and daily temperature

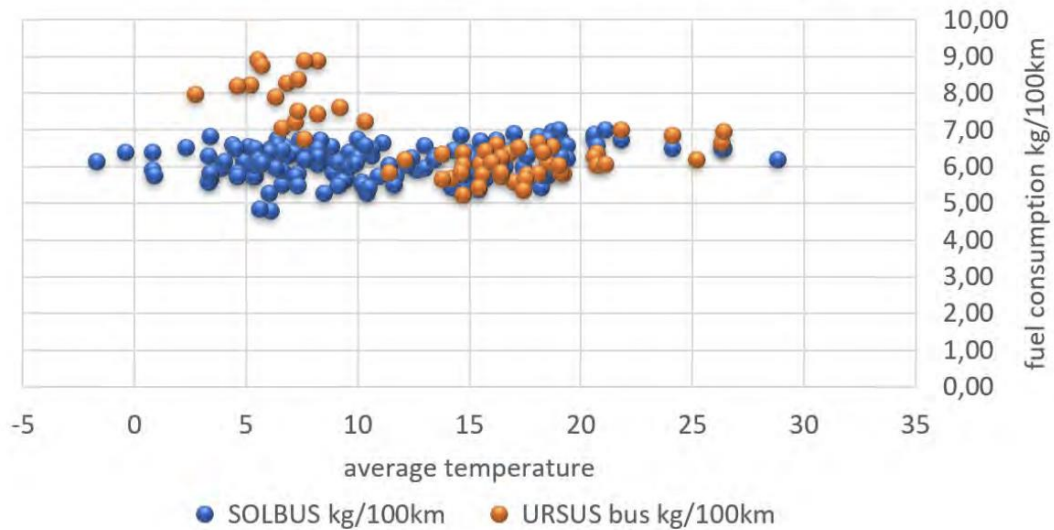


Figura 13: Consumo de combustible según temperatura media diaria. [93]

### Fuel consumption FC bus

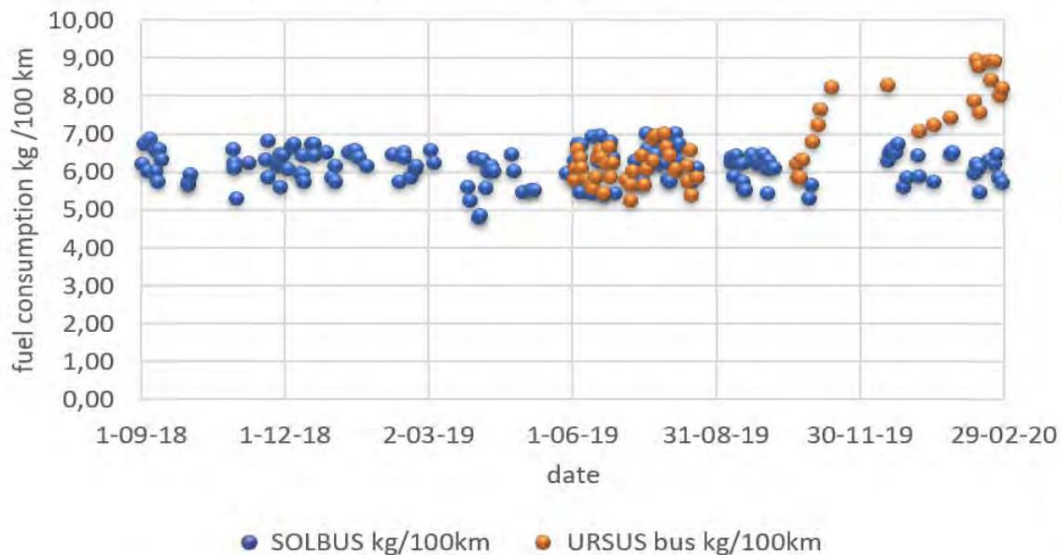


Figura 14: Consumo de combustible según época del año. [93]

Con este último dato, se puede obtener el consumo total de hidrógeno que se daría en el año 2030. Los datos base para este caso están representados en la Tabla 17.

Autobuses	Cantidad	Consumo (kgH <sub>2</sub> /100km)	Consumo kgH <sub>2</sub> total	km recorridos
Hidrógeno	2.369	6,00	8.534.663,33	142.244.388,84

*Tabla 17: Datos de referencia para el caso 2.*

#### **4.2.1.3.1 Cálculo de las emisiones asociadas a la procedencia del combustible**

En este caso sólo hay un combustible, el hidrógeno, pero dos escenarios posibles: que el hidrógeno sea verde o azul.

Como ya se ha indicado anteriormente, el hidrógeno verde no lleva emisiones asociadas ni al consumo del mismo, ni a su producción. Por lo que las emisiones asociadas a la procedencia del combustible en este escenario de empleo de H<sub>2</sub> verde son igual a 0. En la Tabla 18 se muestra este razonamiento. Por el contrario, si el hidrógeno es azul, sí que cuenta con emisiones de CO<sub>2</sub>e asociadas a su fabricación. Según [94], por cada kg de hidrógeno azul producido, se emiten 52 gramos de CO<sub>2</sub>e; y según [95], por cada kg de hidrógeno gris producido, se emiten 10.000 gramos de CO<sub>2</sub>e. Con estos datos y con la información de la Tabla 17, se puede calcular cuales serían las emisiones totales debidas a la producción de los correspondientes combustibles. Asimismo, las emisiones del H<sub>2</sub> gris sólo se muestran para poder realizar la comparación de emisiones asociadas a cada tipo de hidrógeno, resultando éstas tan elevadas que no se contemplan como una solución a la descarbonización, por ello no se analizarán en este proyecto.

Producción de hidrógeno	Emisiones		Emisiones totales	
· Hidrógeno gris	10.000,00	gr CO2e/kgH2	85.346,63	toneladas de CO2e
· Hidrógeno azul	52,00	gr CO2e/kgH2	443,80	toneladas de CO2e
· Hidrógeno verde	0,00	gr CO2e/kgH2	0,00	toneladas de CO2e

Tabla 18: Emisiones según procedencia del hidrógeno. Elaboración propia [94][95]

#### 4.2.1.3.2 Cálculo de las emisiones asociadas a la fabricación, mantenimiento y reciclaje de los autobuses

Al igual que en los casos anteriores, se usan unos factores de emisión y unas características proporcionados por [85], pero para este caso, aplicadas a vehículos eléctricos de celdas de combustible de hidrógeno en el año 2030, estas se muestran en la Tabla 12 y en la Tabla 14.

Como se puede observar en la Tabla 17, se conoce la cantidad de autobuses de hidrógeno que podría darse en el año 2030. Si se multiplica el factor de emisión por los parámetros correspondientes, se obtiene la cantidad de emisiones asociadas a cada autobús, cantidad que multiplicada por el total de autobuses nos da la cantidad de CO<sub>2</sub>e emitido a la atmósfera debido a la producción y mantenimiento de los autobuses durante el año 2030.

$$Eah = (Fdh * P + Fct * Ct/5) * Nh$$

$$Eah = \left( 5,60 \frac{TmCO2}{Tm} * 11.600,00 \frac{Tm}{autobús} + 2,4 \frac{TmCO2}{autobús} * \frac{30kg}{5kg} \right) * 2.369 \text{ autobús}$$

$$= 202.217,84 \text{ TmCO2e}$$

Donde: *Eah* – emisiones CO<sub>2</sub>e de autobuses hidrógeno; *Fdh* – factor de emisión de chasis + sistema de propulsión autobuses diésel y eléctricos; *P* – masa de un autobús en vacío; *Fct* – Factor de emisión de fabricación de celda de combustible más tanque de 5kg de

*almacenamiento de hidrógeno;  $C_t$  – capacidad media de los tanques de almacenamiento de hidrógeno de los autobuses;  $N_h$  – número de autobuses de hidrógeno*

Se concluye entonces, que la cantidad de emisiones de dióxido de carbono asociadas a la fabricación y mantenimiento de los autobuses de 2030 en este caso es igual a 202.217,84 toneladas de CO<sub>2e</sub>.

#### **4.2.2 ANÁLISIS ECONÓMICO**

Además de analizar si las situaciones serían competentes en cuanto a reducción de emisiones, se pretende estudiar cuál de las alternativas supondría menos costes en el año 2030.

Se supone que la flota de autobuses ha sido adquirida entre el 2023 y el 2030, de modo que para 2030, los 2369 autobuses, en el caso 1, eléctricos, y en el caso 2, de celdas de combustible de hidrógeno, ya están en funcionamiento.

Si bien es cierto que el precio de cada uno de ellos puede diferir según la empresa fabricante o las características especiales de cada uno, la diferencia no debería ser muy grande. Además, sería inviable la adquisición de todos los autobuses a la vez, por la gran cantidad de dinero que requeriría, así que el coste de compra no se tendrá en cuenta en este análisis.

Como tampoco es posible determinar el año de compra de cada vehículo, se supone que la depreciación es constante a lo largo de los 20 años de vida útil [96] de los vehículos para así poder aproximar el gasto debido al uso de los autocares correspondiente al año 2030.

El principal gasto contabilizado será el producido a raíz del consumo del combustible correspondiente a cada caso, y a mayores de este, se contarán los producidos por el mantenimiento de los vehículos. Otros gastos como seguros, personal, etc. no se tienen en cuenta ya que son gastos que se tendrían igualmente, aunque la flota de autobuses fuera de combustibles fósiles.

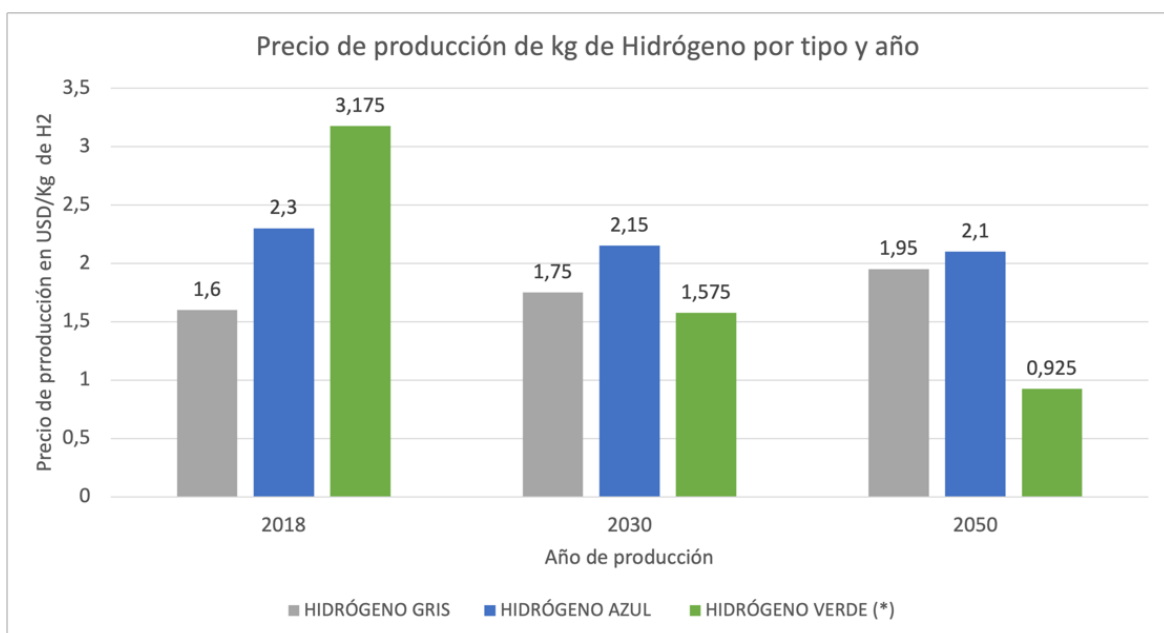
#### 4.2.2.1 Gastos asociados al consumo de combustible

Del análisis anterior se conocen los consumos medios de cada tipo de autobús previsto para el año 2030, al igual que el total de km recorridos. Es necesario determinar los precios de los combustibles para así poder calcular el precio de su uso.

Según [97] para el año 2030 en Europa el precio de la electricidad rondará los 40€ por MWh gracias a las grandes inversiones en energías renovables.

La Unión Europea se ha comprometido a invertir en hidrógeno verde entre el 2023 y el 2030 hasta 430.000 millones de dólares americanos, lo que conseguirá que el precio de su producción, hasta ahora muy elevado, disminuya a niveles asequibles para la sociedad [98].

Para la proyección del precio de producción del hidrógeno, se ha tomado como referencia un estudio realizado en 2019 [99] en el que se tienen en cuenta los problemas más determinantes a la hora de la producción de esta sustancia, tanto de procedencia renovable como de no renovable con captación de CO<sub>2</sub>, estima con métodos estadísticos el precio de estos tipos de hidrógeno para el año 2030 y 2050 (Figura 15)



*Figura 15: Precio de producción del hidrógeno por tipo y año. Elaboración propia [99]*

Otra fuente [100] corrobora estos datos, ya que indica que muy posiblemente el precio del hidrógeno renovable (verde) se encuentre entre 1,1 y 2,4 €/kgH<sub>2</sub> y entre el 2 y 2,5€/kgH<sub>2</sub> para el hidrógeno procedente de fuentes fósiles con bajas emisiones debido a su captura y almacenamiento (azul). Por todo ello, para este análisis se tomarán los siguientes datos:

- Precio hidrógeno verde: 1,75€/kgH<sub>2</sub>
- Precio hidrógeno azul: 2,2 €/kgH<sub>2</sub>

En la Tabla 19 se muestran los resultados de los cálculos pertinentes.

	<b>COMBUSTIBLE</b>		
<b>CASO 1</b>	Precio (€/MWh)	Consumo (kWh)	Coste total (€)
	40,00	183.082.752,87	7.323.310,11
<b>CASO 2</b>	Precio (€/KgH <sub>2</sub> )	Consumo (KgH <sub>2</sub> )	Coste total (€)
<b>CASO 2.1 (H<sub>2</sub> azul)</b>	2,20	8.534.663,33	18.776.259,33
<b>CASO 2.2. (H<sub>2</sub> verde)</b>	1,75		14.935.660,83

*Tabla 19: Coste total por combustible en cada caso.*

#### **4.2.2.2 Gastos asociados al mantenimiento de los vehículos**

Los gastos de mantenimiento incluyen: costos por mantenimiento preventivo, costos de operación, costos de mantenimiento específicos, mantenimiento basado en condiciones específicas, etc. A grandes rasgos, se puede concluir que el precio de mantenimiento por kilómetro de un autobús de celdas de hidrógeno es de 0,273€, mientras que el de uno eléctrico es de 0,170€ [101].

Se muestra en la Tabla 20 los resultados de los cálculos pertinentes.

<b>MANTENIMIENTO</b>			
<b>CASO 1</b>	Precio (€/km)	Distancia recorrida (km)	Coste total (€)
	0,17	142.244.388,84	24.181.546,10
<b>CASO 2</b>	Precio (€/km)	Distancia recorrida (km)	Coste total (€)
<b>CASO 2.1 (H2 azul)</b> <b>CASO 2.2. (H2 verde)</b>	0,27	142.244.388,84	38.832.718,15

*Tabla 20: Coste total por mantenimiento en cada caso.*

Y finalmente, en la Tabla 21, se pueden apreciar los costes totales.

	<b>TOTAL (€)</b>
<b>CASO 1</b>	31.504.856,22
<b>CASO 2.1 (H2 azul)</b>	57.608.977,48
<b>CASO 2.2. (H2 verde)</b>	53.768.378,98

*Tabla 21: Coste total de la flota por caso.*



### 4.3 RESULTADOS

A modo resumen, se presenta en la Tabla 22, en la Tabla 23 y en la Tabla 24 los resultados finales del análisis de reducción de emisiones. Así como el análisis desde el punto de vista económico en la Tabla 25.

EMISIONES	2021 – caso base	
* Directas	132.042,60	Toneladas de CO2e
* Indirectas	240.187,29	Toneladas de CO2e
<b>Total</b>	<b>372.229,89</b>	<b>Toneladas de CO2e</b>

*Tabla 22: Resultados de emisiones del caso base.*

EMISIONES	Caso 1 - 2030a		Caso 1 - 2030b	
* Directas	0,00	Toneladas de CO2e	0,00	Toneladas de CO2e
* Indirectas	182.727,56	Toneladas de CO2e	184.325,42	Toneladas de CO2e
<b>Total</b>	<b>182.727,56</b>	<b>Toneladas de CO2e</b>	<b>184.325,42</b>	<b>Toneladas de CO2e</b>
<b>Reducción</b>	<b>50,91%</b>		<b>50,48%</b>	

*Tabla 23: Resultados de emisiones del caso 1.*

EMISIONES	Caso 2 - 2030 - H2 verde		Caso 2 - 2030 - H2 azul	
* <b>Directas</b>	0,00	Toneladas de CO2e	0,00	Toneladas de CO2e
* <b>Indirectas</b>	202.217,84	Toneladas de CO2e	202.661,64	Toneladas de CO2e
<b>Total</b>	202.217,84	Toneladas de CO2e	202.661,64	Toneladas de CO2e
<b>Reducción</b>	45,67%		45,55%	

*Tabla 24: Resultados de emisiones del caso 2.*

	TOTAL (€)	TOTAL (€/autobús)
<b>CASO 1</b>	31.504.856,22	13.298,80
<b>CASO 2.1 (H2 azul)</b>	57.608.977,48	24.317,85
<b>CASO 2.2. (H2 verde)</b>	53.768.378,98	22.696,66

*Tabla 25: Resultados del análisis económico de todos los casos.*

Se ha podido comprobar que todos los escenarios suponen una reducción considerable de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en la atmósfera, siendo el caso 1.a el que mayor reducción conseguiría, aunque sin mucha diferencia con respecto al caso b, el escenario más realista de los dos. Esto se debe a que los combustibles del caso base, tanto el gas natural comprimido, el cual se supone que es una opción sostenible, y el diésel, causan grandes cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub>e a la atmósfera, tanto directas como indirectas.

Al contrario de lo que se podía esperar, los autobuses de hidrógeno no suponen una mejora climática con respecto a los autobuses eléctricos de baterías. Esto puede deberse a que la tecnología de los segundos está mucho más estudiada y, consecuentemente, más avanzada que la de los autocares propulsados por hidrógeno. Aun teniendo en cuenta la fabricación y el remplazo de la batería eléctrica de los autocares, las emisiones procedentes de las celdas

de combustible y los tanques de almacenamiento, y, sobre todo, de su mantenimiento, son mucho mayores, independientemente de si el tipo de hidrógeno es renovable o no.

Lo mismo pasa si nos fijamos en el análisis económico. Donde podemos observar como el coste asociado a los autobuses eléctricos es mucho menor que el de hidrógeno, ya sea renovable o no. Los autocares eléctricos llevan en el mercado muchos años, al contrario que los autobuses de hidrógeno, que son relativamente nuevos y todavía están en desarrollo.

De esta manera, si se quiere obtener una situación óptima, está muy claro que, tanto en reducción de emisiones como en disminución de costes, la opción más viable es la de una flota completamente formada por autobuses 100% eléctricos, al menos, hoy en día es lo que se conoce que será más económico y efectivo.

## **Capítulo 5. CONCLUSIONES**

Probablemente, la consciencia de la existencia y las consecuencias del cambio climático y del calentamiento global ya existía en el lector con anterioridad a este trabajo. Si bien es cierto que, gracias a la evidencia mencionada, queda muy claro que la lucha en su contra y la necesidad de un cambio no muy lejano es imprescindible para la conservación en buen estado del planeta tierra y para el bienestar de las generaciones venideras.

Como se puede notar, los ejemplos de acuerdos y medidas a fin de mitigar los efectos del cambio climático (Acuerdo de París, Protocolo de Kioto, Agenda 2030...) mencionados anteriormente, demuestran el compromiso de las naciones con esta lucha. Impulsan a las personas y a las instituciones a vivir una vida más sostenible, concienciando de la importancia de reducir la huella de carbono.

Otro aspecto que destacar es que, después del estudio de las posibles alternativas a los combustibles tradicionales nada sostenibles, se puede concluir que, hoy en día, la elección más beneficiosa es el uso de electricidad como alternativa. Esto se debe principalmente a que es la tecnología que más tiempo lleva desarrollándose y la que más ejemplos en la vida real tiene, y, en consecuencia, la que más efectiva y eficiente es. Sin embargo, esto no quita que las otras dos opciones estudiadas no sean buenas opciones, simplemente que no están lo suficientemente avanzadas.

Si es verdad que los biocombustibles no parecen tener hueco a largo plazo en el transporte terrestre, si no que más bien semejan una solución momentánea que ayuda a la reducción de emisiones GEI, al menos por ahora, ya que tampoco son objeto de muchas investigaciones actuales en comparación con el hidrógeno o la electricidad en el transporte terrestre. Por otra parte, cabe destacar que su labor de reciclaje y reutilización de residuos es una muy importante contribución a la lucha contra el calentamiento global.

Con respecto al uso del hidrógeno, queda claro que no es viable como método de reducción de emisiones si no se trata de un hidrógeno procedente de fuentes renovables o que, al menos, durante su producción se capturen y almacenen las emisiones ocasionadas. Sería interesante que los gobiernos y las asociaciones destinaran más esfuerzos al estudio y desarrollo de esta tecnología, pues se trata de un tipo de combustible que puede ser completamente sostenible y, además, muy fácil de utilizar.

Estas afirmaciones también son apoyadas por los resultados derivados del análisis del caso práctico, a partir del cual se ha podido comprobar como de aquí a 2030 en la ciudad de Madrid, la mejor opción (entre las dos generales planteadas) para la descarbonización de su flota de autobuses urbanos, es el uso de vehículos eléctricos, tanto por las razones mencionadas como por el esfuerzo económico que supondría el uso de hidrógeno, mayor que en el caso de la electricidad, ligado a una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>e considerablemente menor. Todo esto, teniendo siempre muy presente que las condiciones reales de la economía, de la tecnología sostenible y del sector transporte terrestre del futuro son desconocidas, y solo se pueden proyectar y/o predecir y/o estimar.

Finalmente, hay que añadir que si no se actúa más efusivamente en la descarbonización del sector transporte (terrestre y otros) de aquí a 2030 y a 2050 como meta límite, las consecuencias, ya negativas, podrían ser cada vez más irreversibles y catastróficas en todos los aspectos de la vida. Todavía hay mucho trabajo por hacer y mucha tecnología que descubrir, pero reducir y eliminar el CO<sub>2</sub> y todas las otras sustancias contaminantes asociadas al transporte público en las ciudades, es un gran paso en el buen camino.

## Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Cumbre del clima: transporte” Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, [en línea]. Disponible en: <https://www.mitma.gob.es/ministerio/proyectos-singulares/cumbre-del-clima/transporte> [accedido el 4 de julio de 2023]
- [2] “Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2020 report 2022”, European Environmental Agency, 2022. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/annual-european-union-greenhouse-gas-1>
- [3] “El Pacto verde europeo: Objetivo 55”. Consejo de la Unión Europea. Disponible en <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>, 2023 [accedido el 18 de abril de 2023]
- [4] “Emisiones de CO<sub>2</sub> de los coches: hechos y cifras. (infografía)”, Parlamento Europeo, [en línea]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia> [accedido el 4 de julio de 2023]
- [5] “Los Objetivos de Desarrollo Sostenible”, Organización de las Naciones Unidas, [en línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> [accedido el 22 de marzo de 2023]
- [6] “Efecto invernadero”, University of Calgary, 2022, [en línea]. Disponible en: [https://energyeducation.ca/Enciclopedia\\_de\\_Energia/index.php?title=Efecto\\_invernadero&oldid=792](https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php?title=Efecto_invernadero&oldid=792) [accedido el 25 de abril de 2023]
- [7] “Los gases de efecto invernadero, muy peligrosos para nuestro planeta”, Fundación Aquae, 2022, [en línea]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/los-gases-de-efecto-invernadero/> [accedido el 7 de febrero de 2023]
- [8] “Cambio climático”, Organización de las Naciones Unidas, [en línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange> [accedido: 14 de abril de 2023]

- [9] Cuenta de emisiones a la atmósfera 2022, Instituto Nacional de Estadística (INE), 2022. Disponible en: <https://www.ine.es/index.htm>
- [10] “Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero”, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/resumen\\_inventario\\_gei\\_ed\\_2023\\_tcm30-560383.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/resumen_inventario_gei_ed_2023_tcm30-560383.pdf) [accedido el 8 de febrero de 2023]
- [11] H.O. Benavides, G. E. León. “Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático.”, Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales, Colombia, nota técnica, 2007. Disponible en: [https://www.academia.edu/33557191/INFORMACION\\_TECNICA\\_SOBRE\\_GASES\\_DE\\_EFECTO\\_INVERNADERO\\_Y\\_EL\\_CAMBIO\\_CLIMATICO](https://www.academia.edu/33557191/INFORMACION_TECNICA_SOBRE_GASES_DE_EFECTO_INVERNADERO_Y_EL_CAMBIO_CLIMATICO)
- [12] C. Nunez. “Gases de efecto invernadero: qué son y cómo afectan al cambio climático.” National Geographic, 2023, [en línea]. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/gases-efecto-invernadero-que-son-efectos> [accedido el 16 de abril de 2023]
- [13] “¿Qué es la huella de carbono y por qué es vital reducirla para frenar el cambio climático?”, Iberdrola, [en línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/huella-de-carbono> [accedido el 7 de febrero de 2023]
- [14] “Cambio climático”, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, [en línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/> [accedido el 15 de febrero de 2023]
- [15] “El cambio climático en España: impacto y consecuencias”. National Geographic, [en línea]. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2017/10/el-cambio-climatico-en-espana-impacto-y-consecuencias> [accedido el 20 de febrero de 2023]

- [16] I. Puigdueta, A. Sanz, “Doce años del Protocolo de Kioto”, Universidad Politécnica de Madrid, 2017, [en línea]. Disponible en:  
[https://www.upm.es/?id=cdee4f93bf54a510VgnVCM10000009c7648a\\_\\_\\_\\_&prefmt=articulo&fmt=detail](https://www.upm.es/?id=cdee4f93bf54a510VgnVCM10000009c7648a____&prefmt=articulo&fmt=detail) [accedido el 4 de febrero de 2023]
- [17] Editorial RSyS, “Protocolo de Kioto: qué es, objetivos, acuerdos y países”, Responsabilidad Social Empresarial y Sustentabilidad, 2022, [en línea]. Disponible en:  
<https://responsabilidadsocial.net/protocolo-de-kioto-que-es-objetivos-acuerdos-y-paises/> [accedido el 4 de febrero de 2023]
- [18] A. García, “El papel de la Unión Europea en la consecución de un acuerdo sustitutivo del Protocolo de Kioto: de Bali a París”, Revista de estudios europeos, (68), 2016. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5900285>
- [19] “El Protocolo”, Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, [en línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-el-cambio-climatico/naciones-unidas/protocolo-kioto.aspx> [accedido el 5 de febrero de 2023]
- [20] “¿Qué es el acuerdo de París?”, Naciones Unidas, [en línea]. Disponible en:  
<https://unfccc.int/es/most-requested/que-es-el-acuerdo-de-paris> [accedido el 5 de mayo de 2023]
- [21] “Pacto Verde Europeo”, Consejo de la Unión Europea, [en línea]. Disponible en:  
<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/> [accedido el 10 de mayo de 2023]
- [22] “Plan Nacional de adaptación al cambio climático”, Ministerio para la Transición ecológica y Reto Demográfico, [en línea]. Disponible en:  
<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/plan-nacional-adaptacion-cambio-climatico/default.aspx#:~:text=Tiene%20como%20principal%20objetivo%20evitar,análisis%2C%20reflexión%20y%20participación%20pública.> [accedido el 6 de junio de 2023]



- [23] “Proyectos de Ley de Cambio Climático y Transición ecológica”, La Moncloa, 2020, [en línea]. Disponible en:  
<https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/Paginas/enlaces/190520-enlace-clima.aspx> [accedido el 3 de abril de 2023]
- [24] “Transmission network development plan 2021-2026 period”, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en:  
[https://www.planificacioneolica.es/sites/webplani/files/2022-09/REE\\_PLANDESARROLLO\\_2022-26\\_EN.pdf](https://www.planificacioneolica.es/sites/webplani/files/2022-09/REE_PLANDESARROLLO_2022-26_EN.pdf) [accedido el 3 de mayo de 2023]
- [25] “Principios y acciones regulatorias de la descarbonización energética que contribuyen a un marco sostenible y eficiente para combatir el cambio climático.”, Iberdrola, [en línea]. Disponible en:  
<https://www.iberdrola.com/conocenos/descarbonizacion-economia-principios-acciones-regulacion> [accedido el 23 de noviembre de 2022]
- [26] “Transición energética, la solución para frenar el cambio climático”, Iberdrola, [en línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hacia-un-planeta-verde>. [accedido el 1 de diciembre de 2022]
- [27] A. Orús, “Las energías renovables en España – datos estadísticos”, Statista, 2023, [en línea]. Disponible en: <https://es.statista.com/temas/6675/las-energias-renovables-en-espana/#topicOverview> [accedido el 30 de junio de 2023]
- [28] “El sistema eléctrico español”, Red Eléctrica, 2021. Disponible en:  
[https://www.sistemaelectrico-ree.es/sites/default/files/2022-08/InformeSistemaElectrico\\_2021.pdf](https://www.sistemaelectrico-ree.es/sites/default/files/2022-08/InformeSistemaElectrico_2021.pdf) [accedido el 28 de mayo de 2023]
- [29] J. Huete, “La ruta de Repsol hacia la descarbonización del transporte”, InnovaSpain, 2023, [en línea]. Disponible en: <https://www.innovaspain.com/repsol-descarbonizacion-transporte/> [accedido el 5 de junio de 2023]
- [30] “Global EV Outlook 2020”, International Energy Agency (IEA), Reino Unido, informe, 2020 [en línea]. Disponible en:

[https://iea.blob.core.windows.net/assets/af46e012-18c2-44d6-becd-bad21fa844fd/Global\\_EV\\_Outlook\\_2020.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/af46e012-18c2-44d6-becd-bad21fa844fd/Global_EV_Outlook_2020.pdf)

- [31] F. Furtado, J. Paternina Blanco, J.P. Pritchard y P. Vazano. (2021). *Escenarios de políticas públicas para descarbonizar el sistema del transporte en Argentina* [Presentación de PowerPoint]. Disponible en: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/escenarios-politicas-publicas-descarbonizar-transporte-argentina.pdf>
- [32] “Emisiones contaminantes del transporte”, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2020, [en línea]. Disponible en: [https://observatoriotransporte.mitma.es/inform/es/2020/sostenibilidad-ambiental/-emisiones-y-eficiencia-ambiental/emisiones-contaminantes-del-transporte#nota\\_70](https://observatoriotransporte.mitma.es/inform/es/2020/sostenibilidad-ambiental/-emisiones-y-eficiencia-ambiental/emisiones-contaminantes-del-transporte#nota_70) [accedido el 20 de abril de 2023]
- [33] European Environment Agency, 18 abr. 2023, “EEA greenhouse gases - data viewer”, Unión Europea. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>
- [34] “El transporte urbano y metropolitano en España”, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2022. [En línea]. Disponible en: [https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/estudios\\_transporte/TransporteUrbanoMetropolitano2022\\_2.pdf](https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/estudios_transporte/TransporteUrbanoMetropolitano2022_2.pdf) [accedido el de mayo de 2023]
- [35] W. B. Rice, *La historia de los combustibles fósiles*, California, Teacher Created Materials, 2018. Disponible en: [https://books.google.pl/books?hl=es&lr=&id=hIEuDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=los+combustibles+f%C3%B3siles&ots=aMMzLQA-no&sig=PiMoK23\\_ADMj6ArEKkNmisybWOc&redir\\_esc=y#v=onepage&q=los%20combustibles%20f%C3%B3siles&f=false](https://books.google.pl/books?hl=es&lr=&id=hIEuDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=los+combustibles+f%C3%B3siles&ots=aMMzLQA-no&sig=PiMoK23_ADMj6ArEKkNmisybWOc&redir_esc=y#v=onepage&q=los%20combustibles%20f%C3%B3siles&f=false) [accedido el 27 de mayo]

- [36] “Energías fósiles: ¿Cuáles existen?”. Junkers & Bosch, [en línea]. Disponible en: <https://www.junkers-bosch.es/conocimiento/energia/energias-fosiles/> [accedido el 27 de mayo de 2023]
- [37] G. Portillo, “Los combustibles fósiles”, Renovables Verdes, 2023, [en línea]. Disponible en: <https://www.renovablesverdes.com/combustibles-fosiles/> [accedido el 27 de mayo de 2023]
- [38] “Principales usos de los combustibles fósiles”, Combustibles Aragón, 2021, [en línea]. Disponible en: <https://combustiblesaragon.es/principales-usos-de-los-combustibles-fosiles/> [accedido el 20 de mayo de 2023]
- [39] “¿Qué son las energías renovables?”, Naciones Unidas, [en línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy> [accedido el 27 de mayo de 2023]
- [40] “Vehículos eléctricos.”, Ministerio de energía de Chile, [en línea]. Disponible en: <https://energia.gob.cl/electromovilidad/vehiculos-electricos> [accedido el 8 de mayo de 2023]
- [41] M. S. Gascón. “La electrificación del transporte.” Presupuesto Y Gasto Público, 97, 59–78, 2019, [en línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7256734> [accedido el 28 de abril de 2023]
- [42] “Beneficios ambientales de la movilidad eléctrica en las grandes ciudades”, Gobierno de México, 2021, [en línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/beneficios-de-la-movilidad-electrica-por-el-derecho-a-un-medio-ambiente-sano?idiom=es> [accedido el 24 de mayo de 2023]
- [43] M. Sebastián, “La electrificación del transporte”, UCM, 2019. Disponible en: <https://documentos.fedea.net/pubs/fpp/2019/12/FPP2019-05.pdf> [accedido el 20 de mayo de 2023]
- [44] R. Batista, “Descubre cuánto gasta un coche diésel en 100km”, Renault Getafe, 2023, [en línea]. Disponible en: <https://renaultgetafe.es/cuanto-gasta-un-diesel-en-100->



- [50] L. Gómez, “El tren mira a Europa para limitar el diésel con el 35% de la red sin electrificar.”, *El economista*, 2021, [en línea]. Disponible en: <https://www.economista.es/empresas-finanzas/noticias/11216576/05/21/El-tren-mira-a-Europa-para-limitar-el-diesel-con-el-35-de-la-red-sin-electrificar.html> [accedido el 9 de mayo de 2023]
- [51] “El autobús es el modo que menos emisiones GEI genera: 3,7 veces menos que el avión, 5,5 veces menos que el automóvil y un 13% menos que el tren.”, *Confebús*, 2020, [en línea]. Disponible en: <http://www.confibus.org/publicaciones/ver/2873/el-autobus-es-el-modo-que-menos-emisiones-gei-genera-37-veces-menos-que-el-avion-55-veces-menos-que-el-automovil-y-un-13-menos-que-el-tren#:~:text=Un%20autob%C3%BAs%20emite%2028%2C4,que%20emite%20cada%20coche%20particular> [accedido el 9 de mayo de 2023]
- [52] “Vehículo electrificado. Informe anual 2022”, *ANFAC*, 2023, [en línea]. Disponible en: <https://anfac.com/publicaciones/informe-anual-de-vehiculo-electrificado-2022/> [accedido el 20 de junio de 2023]
- [53] “EMT adquiere 150 autobuses eléctricos estándar por 81 millones de euros”. *EMT Madrid Noticias*, 2022, [en línea]. Disponible en: <https://www.emtmadrid.es/Noticias/EMT-adquiere-150-autobuses-electricos-estandar-por.aspx> [accedido el 5 de mayo de 2023]
- [54] “Estas son las ciudades españolas que más invierten en buses eléctricos”, *Portal Movilidad España*, 2021, [en línea]. Disponible en: <https://portalmovilidad.com/estas-son-las-ciudades-espanolas-que-mas-invierten-en-buses-electricos/> [accedido el 22 de junio de 2023]
- [55] A. Semprún, “Electrificar las vías del tren para acabar con el diésel cuesta 2.810 millones”, *El Economista*, 2019, [en línea] Disponible en: <https://www.economista.es/empresas-finanzas/noticias/9887720/05/19/Electrificar-las-vias-del-tren-para-acabar-con-el-diesel-cuesta-2810-millones-.html> [accedido el 23 de mayo de 2023]

- [56] “La alta velocidad alcanza los 4.000km y consolida el liderazgo mundial de España en un modelo de movilidad sostenible”, Adif, 2022, [en línea]. Disponible en: <https://www.adif.es/-/la-alta-velocidad-alcanza-los-4.000-km-y-consolida-el-liderazgo-mundial-de-esp%C3%B1a-en-un-modelo-de-movilidad-sostenible> [accedido el 28 de mayo de 2023]
- [57] R. Cuevas-García, I. Nava Bravo. “Producción de combustibles renovables”, Mundo Nano, vol. 16, n.º 30, p. 1e-50e, 2021, [en línea]. Disponible en: <http://mundonano.unam.mx/ojs/index.php/nano/search> [accedido el 20 de enero de 2023]
- [58] W. Espinoza, M. Goddard, C. Gutiérrez, C. Bonfil, “Los biocombustibles”, ¿Cómo Ves?, [en línea]. Disponible en: <https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/123/los-biocombustibles> [accedido el 24 de mayo de 2023]
- [59] E. Salinas, V. Gasca, “Los biocombustibles”, El cotidiano, nº157, 2009. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>
- [60] J. P. W. Scharlemann, W. F. Laurance, “How green are biofuels”, Science, 2008. Disponible en: [https://www.esa.org/biofuels/presentations/Scharlemann\\_poster.pdf](https://www.esa.org/biofuels/presentations/Scharlemann_poster.pdf)
- [61] “¿Qué son los biocombustibles? A la vanguardia en el desarrollo de los biocombustibles”, Repsol, [en línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/reduccion-emisiones/biocombustibles/index.cshtml> [Accedido el 25 de mayo de 2023]
- [62] Regulación sobre biocarburantes. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en: <https://energia.gob.es/biocarburantes/Paginas/regulacion.aspx> [accedido el 25 de junio de 2023]
- [63] “Biocombustibles y transporte” Cepsa, 2023, [en línea]. Disponible en: <https://www.cepasa.com/stfls/corporativo/FICHEROS/biocombustibles-presskit.pdf>

- [64] “Biogás: el gas limpio que impulsa autobuses”, 20 Minutos, 2017, [en línea].  
Disponible en: <https://www.20minutos.es/noticia/3018003/0/biogas/gas-limpio/impulsa-autobuses/> [accedido el 26 de junio de 2023]
- [65] J. Rico, “Apuestas por el biodiésel para autobuses urbanos”, Energías renovables, 2021, [en línea]. Disponible en: <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/apuestas-por-el-biodiesel-para-autobuses-urbanos-20210611> [accedido el 15 de junio de 2023]
- [66] “Flixbus presentó la línea de autobús más larga de Europa que funciona con biodiésel”, Bioeconomía, 2022, [en línea]. Disponible en: <https://www.bioeconomia.info/2022/10/04/flixbus-presento-la-linea-de-autobus-mas-larga-de-europa-que-funciona-con-biodiesel/> [accedido el 15 de junio de 2023]
- [67] R.D. “El tren entre Algeciras y Córdoba, pionero en usar biocombustibles 2G tras la alianza de Maersk, Cepsa y Renfe”, EuropaSur, 2023, [en línea]. Disponible en: [https://www.europasur.es/campo-de-gibraltar/tren-Algeciras-Cordoba-biocombustibles-Maersk-Cepsa-Renfe\\_0\\_1800420368.html](https://www.europasur.es/campo-de-gibraltar/tren-Algeciras-Cordoba-biocombustibles-Maersk-Cepsa-Renfe_0_1800420368.html) [accedido el 25 de junio de 2023]
- [68] A. González, “Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno”, Asociación Española de Hidrógeno, 2012. Disponible en: [http://www2.udg.edu/Portals/88/proc\\_industrials/5%20-%20Otros%20Combustibles-Hidrogeno.pdf](http://www2.udg.edu/Portals/88/proc_industrials/5%20-%20Otros%20Combustibles-Hidrogeno.pdf)
- [69] A. Pino Griego, “Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno”, Universidad de Sevilla, pp8-25. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/30127/fichero/Cap%C3%ADtulo+2+-+Producci%C3%B3n+de+Hidr%C3%B3geno.pdf>
- [70] J. I. Linares Hurtado y B. Y. Moratilla Soria, *Avances de Ingeniería*. Madrid, 2007.
- [71] “Las mil caras del hidrógeno: del color marrón al dorado”, EL Economista, 2022, [en línea]. Disponible en

- <https://www.eleconomista.es/energia/noticias/11813705/06/22/Las-mil-caras-del-hidrogeno-del-color-marron-al-dorado.html> [accedido el 11 de junio de 2023]
- [72] “¿Por qué Hidrógeno?”, Asociación Española del Hidrógeno, [en línea].  
Disponible en: <https://www.aeh2.org/hidrogeno/> [Accedido el 11 de junio de 2023]
- [73] “Todos los colores del hidrógeno: verde, rosa, turquesa, negro”, Business Insider, [en línea]. Disponible en: <https://www.businessinsider.es/todos-colores-hidrogeno-verde-rosa-turquesa-negro-1198428> [accedido el 11 de junio de 2023]
- [74] “¿Cómo se realiza el transporte de hidrógeno verde?”, Genia Bioenergy, [en línea].  
Disponible en: <https://geniabioenergy.com/el-transporte-del-hidrogeno-verde/>  
[accedido el 6 de junio de 2023]
- [75] P. Asensio, “Hidrógeno y pila de combustible”, Fundación de la Energía.  
Disponible en: <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-paratodos-hidrogeno-y-pila-de-combustible> [accedido el 23 de abril de 2023]
- [76] D. Nuevo, “El autobús de hidrógeno está en toda España”, EsHidrógeno, 2023, [en línea]. Disponible en: <https://eshidrogeno.com/autobus-hidrogeno-madrid/> [accedido el 5 de junio de 2023]
- [77] S. Alcalde, “Estos son los principales proyectos para producir hidrógeno verde en España”, National Geographic España, 2022, [en línea]. Disponible en:  
[https://www.nationalgeographic.com.es/economia-circular/estos-son-principales-proyectos-para-producir-hidrogeno-verde-espana\\_18710](https://www.nationalgeographic.com.es/economia-circular/estos-son-principales-proyectos-para-producir-hidrogeno-verde-espana_18710) [accedido el 6 de junio de 2023]
- [78] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, “Hydrogen roadmap Europe”, Unión Europea, 2019. Disponible en: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0817d60d-332f-11e9-8d04-01aa75ed71a1> [accedido el 22 de mayo de 2023]



- [79] “Próxima parada: transporte público impulsado por hidrógeno”, Abdul Latif Jamel, 2021, [en línea] Disponible en: <https://alj.com/es/perspective/proxima-parada-transporte-publico-impulsado-por-hidrogeno/> [accedido el 22 de mayo de 2023]
- [80] Logistec, “Así viven los países que cuentan con transporte a base de hidrógeno”, Revista Logistec, 2021, [en línea]. Disponible en: <https://www.revistalogistec.com/inicio/noticias-industria/3937-asi-viven-los-paises-que-cuentan-con-transporte-en-base-a-hidrogeno> [accedido el 5 de mayo de 2023]
- [81] “Informe de Gestión: Estado de la información no financiera” EMT Madrid, 2021. Disponible en: <https://www.emtmadrid.es/Ficheros/Portal-Transparencia-2022/EMT-Madrid-Informe-Gestion-y-Estado-Informacion.aspx>
- [82] “EMT cerró 2021 con 300 millones de viajeros y 8,4 millones de beneficio” EMT Madrid, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.emtmadrid.es/Noticias/EMT-cerro-2021-con-300-millones-de-viajeros-y-8,4.aspx> [Accedido el 5 de junio de 2023]
- [83] “La EMT de Madrid transportó 373 millones de viajeros en 2022, 76 millones más que en el año anterior” Gacetín Madrid. [En línea]. Disponible en: <https://www.emtmadrid.es/Noticias/EMT-cerro-2021-con-300-millones-de-viajeros-y-8,4.aspx> [Accedido el 5 de junio de 2023]
- [84] “Gratuidad en EMT” El blog de la EMT. [En línea]. Disponible en; <https://blog.emtmadrid.es/2022/09/15/gratuidad-en-emt/> [Accedido el 5 de junio de 2023]
- [85] A. O’Connell, N. Pavlenko, G. Bieker, S. Searle, “A comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of European heavy-duty vehicles and fuels”, The International Council on Clean Transportation, 2023. Disponible en: <https://theicct.org/publication/lca-ghg-emissions-hdv-fuels-europe-feb23/>
- [86] “Plan Nacional Integrado de Energía y clima 2021-2030”, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/plan-nacional-integrado->

- energia-clima/plannacionalintegradoeenergiayclima2021-2030\_tcm30-546623.pdf  
[accedido el 5 de junio de 2023]
- [87] L. Montes, “El horizonte de las renovables en España: un informe concluye que producirán el 68% de la energía en 2030 y más del 90% en 2050”, Business Insider, 2019, [en línea]. Disponible en: <https://www.businessinsider.es/renovables-produciran-68-energia-2030-90-2050-542001> [accedido el 5 de junio de 2023]
- [88] “Sector Transporte” Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, [en línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/transporte.aspx> [accedido el 3 de mayo de 2023]
- [89] “Convertir un autobús en híbrido llega a ahorrar hasta el 30% de combustible”, ABCMotor, 2016, [en línea]. Disponible en: [https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-convertir-autobus-hibrido-llega-ahorrar-hasta-30-por-ciento-combustible-201604111335\\_noticia.html](https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-convertir-autobus-hibrido-llega-ahorrar-hasta-30-por-ciento-combustible-201604111335_noticia.html) [accedido el 3 de mayo de 2023]
- [90] I. Montero, “El Gas Natural vehicular frente a los combustibles tradicionales: comparativa de emisiones de Gases de Efecto Invernadero de su ciclo de vida en España”, Grupo Gas Natural – Unión Fenosa, 2014. Disponible en: <http://www.conama2014.conama.org/conama2014/download/files/conama2014/CT%202014/1896711612.pdf>
- [91] “El modelo eléctrico español en 2030. Escenarios y alternativas”, PriceWaterHouseCoopers. Disponible en: <https://www.enerclub.es/file/o-mj19uxZO0kEhLjAz6BbA;jsessionid=37E44B26FD8849ED6195A0C1758A5378> [accedido el 7 de junio de 2023]
- [92] C. Márquez, “TMB pone en circulación siete autobuses más de hidrógeno”, *El Periódico*, 2022, [en línea]. Disponible en: <https://www.elperiodico.com/es/barcelona/20220526/tmb-pone-circulacion-siete-buses-hidrogeno-13713547> [Accedido el 13 de junio de 2023]

- [93] R. Nekkers, J. Van Beckhoven, “Hydrogen buses on the Veluwe”, KEOLIS, 2020.  
Disponible en:  
[https://www.h2nodes.eu/images/docs/20200416\\_status\\_verslag\\_2BP\\_Hydrogen\\_buses\\_on\\_the\\_Veluwe\\_Eng\\_.pdf](https://www.h2nodes.eu/images/docs/20200416_status_verslag_2BP_Hydrogen_buses_on_the_Veluwe_Eng_.pdf)
- [94] R. W. Howarth, M. Z. Jacobson, “How green is blue hydrogen?” *Energy Science & Engineering*, vol.9, 2021. [en línea]. Disponible en:  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ese3.956> [Accedido el 13 de junio de 2023]
- [95] Sustentable s.a., “Conozca como se caracterizan los diferentes tipos de hidrógeno”. 2022. [En línea] Disponible en: <https://www.sustentable.cl/conozca-como-se-caracterizan-los-diferentes-tipos-de-hidrogeno/> [Accedido el 13 de junio de 2023]
- [96] “análisis de buses eléctricos para el corredor cero emisiones Eje 8 sur”, C40 Cities Finance Facility (CFF), 2018. Disponible en: <https://cff-prod.s3.amazonaws.com/storage/files/2CVq9EI0ehKvFJbJWd14QHZghxABGbYPCyaYS16s.pdf>
- [97] J. Reglero, “La importancia del sector energético en la economía”, OBS Business School, 2022. Disponible en:  
<https://marketing.onlinebschool.es/Prensa/Informes/Informe%20OBS%20-%20Sector%20energético.pdf>
- [98] V. Smink, “Hidrógeno verde: 6 países que lideran la producción de una de las “energías del futuro” (y cuál es el único latinoamericano)”, *BBC News Mundo*, 2021, [en línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56531777> [Accedido el 28 de marzo de 2023]
- [99] R. Fernández, “Hidrógeno: precio de la producción en 2018, 2030 y 2050, por tipo”, *Statista*, 2022, [en línea]. Disponible en:  
<https://es.statista.com/estadisticas/1293229/hidrogeno-precio-de-la-produccion-en-por-tipo/#:~:text=En%202018%2C%20el%20coste%20de,mitad%2C%201%2C60%20d%C3%B3lares.> [Accedido el 10 de junio de 2023]

- [100] “Una estrategia del hidrógeno para una Europa climáticamente neutra” Comisión Europea, 2020. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?from=DA&uri=CELEX%3A52020DC0301>
- [101] “Scenari e prospettive dell’eletrificazione del trasporto pubblico su strada” Università Bocconi, 2021. Disponible en:  
[file:///Users/evabravo/Documents/AA.%20TFG/Docs%20de%20recursos/ESCENARIOS/Paper%20TCRO\\_caso%20Italia%20es.pdf](file:///Users/evabravo/Documents/AA.%20TFG/Docs%20de%20recursos/ESCENARIOS/Paper%20TCRO_caso%20Italia%20es.pdf)